
BACHELORARBEIT

Herr
Konrad Dietze

**Einsatz von LED als neue
Lichttechnologie in der
Fernsehstudiobeleuchtung
- am Beispiel von
Stufenlinsenscheinwerfern**

Berlin 2014

BACHELORARBEIT

Einsatz von LED als neue Lichttechnologie in der Fernsehstudiobeleuchtung - am Beispiel von Stufenlinsenscheinwerfern

Autor:
Herr Konrad Dietze

Studiengang:
Medientechnik

Seminargruppe:
MT10WF-B

Erstprüfer:
Prof. Dr.-Ing. Wilfried Schmalwasser

Zweitprüfer:
Prof. Dr.-Ing. Rainer Zschockelt

Einreichung:
Berlin, 20.02.2014

BACHELOR THESIS

Application of LED as a new lighting technology in the television studio lighting - Exemplified by Fresnel spotlights

author:

Mr. Konrad Dietze

course of studies:

media technology

seminar group:

MT10WF-B

first examiner:

Prof. Dr.-Ing. Wilfried Schmalwasser

second examiner:

Prof. Dr.-Ing. Rainer Zschockelt

submission:

Berlin, 20.02.2014

Bibliografische Angaben

Konrad Dietze

Einsatz von LED als neue Lichttechnologie in der Fernsehstudiobleuchtung - am Beispiel von Stufenlinsenscheinwerfern

Application of LED as a new lighting technology in the television studio lighting - Exemplified by Fresnel spotlights

81 Seiten, Hochschule Mittweida, University of Applied Sciences,
Fakultät Medien, Bachelorarbeit, 2014

Abstract

Die Arbeit befasst sich mit dem Einsatz der LED-Lichttechnologie bei Stufenlinsenscheinwerfern für die Fernsehstudiobleuchtung. Es wird versucht, die gegenwärtig noch vorhandenen Vorbehalte und kritischen Meinungen zur Farbwiedergabe und Beleuchtungsstärke von LED-Stufenlinsenscheinwerfern, zu relativieren. Weiterhin soll nachgewiesen werden, dass diese Scheinwerfertypen bereits heute eine kosten- und energie günstige Alternative zu bisherigen konventionellen Halogen-Stufenlinsenscheinwerfern sind. Grundlagen über Licht, Farbe und lichttechnische Größen sowie einen Überblick der Leuchtmittel und Scheinwerfertypen in Fernsehstudios werden zunächst vermittelt. Anschließend werden Grundlagen der LED-Lichttechnologie, wie Funktionsweise, Eigenschaften und Farbe sowie die Chancen und Risiken beim Einsatz in Stufenlinsenscheinwerfern der Studiobleuchtung, dargestellt. In einer umfangreichen Testserie unter studiorelevanten Bedingungen, werden Halogen-Stufenlinsenscheinwerfer mit LED-Stufenlinsenscheinwerfern verglichen. Hierbei wird schwerpunktmäßig die Farbabweichung mit Hilfe des Metamerieindex Delta E 2000 im CIELAB-Farbraum sowie die Farbwiedergabe mit Hilfe des Farbwiedergabeindex R_a anhand von Kameramessungen mit verschiedenen Referenz- und Vergleichsscheinwerfern bei der Beleuchtung einer Farbtafel ermittelt. Die Auswertung der Farbwiedergabe und –abweichungen erfolgt über die RGB-Kamerasignale am Waveformmonitor und wird dann durch programmtechnische Mittel als Delta E 2000 bzw. Farbwiedergabe R_a für jede Colorcheckerfarbe berechnet. Die Farbabweichungen zwischen Referenz- und Vergleichsscheinwerfer werden in einer eigens entwickelten Colorcheckertafel und in Säulendiagrammen für jeden Test dargestellt. So werden in den insgesamt 11 Vergleichen verschiedene Lichtsituationen simuliert. Die Vergleichstests stellen verschiedene Misch- und Volllichtsituationen, als auch Bedingungen mit und ohne korrekten Weißabgleich nach. Abschließend werden die Testergebnisse umfangreich bewertet und weitere Parameter zwischen Halogen- und LED-Stufenlinsenscheinwerfern verglichen. Im Fazit wurde festgestellt, dass heutige LED-Stufenlinsenscheinwerfer über umfangreiche funktionelle Neuerungen in der Scheinwerfersteuerung verfügen, die Farbwiedergabe im Bereich von $R_a > 95$ liegt und beachtliche Energieeinsparungen eintreten. Es wurde deutlich, dass heutige LED-Stufenlinsenscheinwerfer bereits eine energie- und kostengünstige Alternative für Halogen-Stufenlinsenscheinwerfer in der Fernsehstudiobleuchtung sind. Ein Ausblick zeigt notwendige, weiterführende Untersuchungen und Entwicklungen auf.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	V
Abkürzungsverzeichnis	VII
Abbildungsverzeichnis	IX
Tabellenverzeichnis	XIII
Vorwort und Danksagung.....	XV
1 Einleitung.....	1
2 Grundlagen und Grundbegriffe der Lichttechnik und Beleuchtung in Fernsehstudios.....	3
2.1 Grundlagen und Grundbegriffe der Lichttechnik	3
2.1.1 Licht und Farbe	4
2.1.2 Lichttechnische Größen und Einheiten.....	13
2.2 Grundlagen und Grundbegriffe der Beleuchtung in Fernsehstudios	15
2.2.1 Leuchtmittel in Fernsehstudios.....	16
2.2.2 Lichtquellen und Scheinwerfertypen in Fernsehstudios	21
3 Grundlagen und Entwicklung der LED-Lichttechnologie.....	27
3.1 Grundlagen der LED-Lichttechnologie.....	27
3.1.1 Funktionsweise von LEDs	27
3.1.2 Eigenschaften und Farben von LEDs	33
3.2 Entwicklung, Chancen, Risiken und Einsatzgebiete der LED-Lichttechnologie...	41
4 Vergleich von konventioneller Lichttechnik mit neuartiger LED-Lichttechnologie - am Beispiel von Stufenlinsenscheinwerfern in der Fernsehstudiobleuchtung	49
4.1 Beschreibung der Vergleichsobjekte	49
4.1.1 Parameter der konventionellen Stufenlinsenscheinwerfer	49
4.1.2 Parameter der LED-Stufenlinsenscheinwerfer.....	51
4.2 Beschreibung der Vergleichsmethode für den Fernsehstudiotest.....	54
4.2.1 Versuchsaufbau und verwendete Messmittel	54
4.2.2 Angewandte wissenschaftliche Methode der Farbmessung und der Berechnung der Farbabstände (Delta E im CIELAB2000).....	61

4.3	Auswertung des Fernsehstudiotest und weitere Vergleiche.....	67
4.3.1	Ergebnisse, Auswertung und Vergleich.....	67
4.3.2	Fazit und Ausblick.....	77
5	Schluss	80
	Literaturverzeichnis	XVI
	Anlagenverzeichnis.....	XXIII
	Anlagen	XXIV
	Eigenständigkeitserklärung.....	LXIV

Abkürzungsverzeichnis

a.m.S.	aus meiner Sicht
Abb.	Abbildung
ACN	Architecture for Control Networks
AMPAS	Academy of Motion Picture Arts and Sciences
ARRI	Arnold & Richter Cine Technik GmbH & Co. Betriebs KG
Brenner	umgangssprachlich für Leuchtmittel
bzw.	Beziehungsweise
ca.	circa
CCD	Charge-Coupled Device
CE	Kennzeichnung der Hersteller
CIE	Internationalen Beleuchtungskommission
CIELAB2000	CIELAB-Farbraum mit Delta E CIE2000
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
COB	Chip on Board
CQS	Color quality scale
CRI	Colour Rendering Index
CTO	Change to Orange
DIMMEN	Reduzierung des Lichtstromes
DIN	Deutsches Institut für Normung
DMX	Digital Multiplex (Protokoll)
e.V.	eingetragener Verein
ebd.	ebenda
eng.	englisch
EU	europäische Union
FOCUS	bei SLSW zwischen FST und SST wählen
FS	Fernsehstudio
FST	Floodstellung
GSM	Groupe Spécial Mobile
HMI	Hydrargyrum Medium-Arc Iodide
HSMW	Hochschule Mittweida
IR	Infrarot
LCD	Liquid Crystal Display
LDK	Studiokamera der Firma Grassvalley
LED	Leuchtdiode (eng. Light-Emitting Diode)
Lichttech.	Lichtechnische (z.B. Größen)
m.A.n.	meiner Ansicht nach

NIST	National Institute of Standards and Technology
NSP	Narrow Spot
o.g.	oben genannt
OCP	Operation Control Panel
PAN	Schwenken (Horizontal)
PAR	Preßglaslampe, in PAR-Scheinwerfern eingesetzt
QLED/QDLED	Quantum-Dot-LED
R _a	Farbwiedergabeindex
RDM	Remote Device Management
RGB	Rot-Grün-Blau
RGBW	Rot-Grün-Blau-Weiß
RSW	Referenzscheinwerfer
SLSW	Stufenlinsenscheinwerfer
SMD	Surface Mount Device
sog.	sogenannt
SST	Spotstellung
Std.	Stunde
Stk.	Stück
SW	Scheinwerfer
Tab.	Tabelle
TILT	Neigen (Vertikal)
TLCI	Television Lighting Consistency Index
TV	Television
u.a.	unter anderem
UV	Ultraviolett
VDE	Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.
Vgl.	Vergleich
VSW	Vergleichsscheinwerfer
WDMX	Wireless Digital Multiplex
WFM	Waveformmonitor
WIFI	Wireless Fidelity
z.B.	zum Beispiel
z.Zt.	zur Zeit
ZigBee	Industriestandard für Funknetze

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Verteilung der elektromagnetischen Wellen des Lichtes mit dem Spektrum des sichtbaren Lichtes.	4
Abbildung 2: Beispielhaft die Spektrale Remissionskurve von Halogenlampen und die Empfindlichkeit des menschlichen Auges.....	5
Abbildung 3: Beispielhaft die Spektrale Remissionskurve einer Energiesparlampe und die Empfindlichkeit des menschlichen Auges.....	5
Abbildung 4: CIE-Normfarbtafel mit der sog. Black-Body-Kurve.	6
Abbildung 5: CIE-Normfarbtafel mit den sog. MacAdam-Ellipsen.	11
Abbildung 6: Vollständiger CIELAB-Farbraum.....	12
Abbildung 7: Lichttechnische Zusammenhänge und deren Messgrößen.	13
Abbildung 8: Formel zur Berechnung des Lichtstroms.....	14
Abbildung 9: Formel zur Berechnung der Beleuchtungsstärke.	14
Abbildung 10: Formel zur Berechnung der Lichtstärke.	14
Abbildung 11: Formel zur Berechnung des Raumwinkels.....	14
Abbildung 12: Beleuchtungstechnischen Kreislauf in einem Fernsehstudio.....	16
Abbildung 13: Übersicht über die Lampensysteme.....	17
Abbildung 14: Querschnitt einer Fresnel-Linse und einer üblichen Linse mit gleicher Brennweite.	23
Abbildung 15: Innerer Aufbau eines Stufenlinsenscheinwerfers vom Typ ARRI 650Plus.....	23
Abbildung 16: Variation des Abstrahlwinkels durch Abstandänderung zwischen Komponente und Stufenlinse.....	23
Abbildung 17: Aufbau eines neuartigen LED-Stufenlinsenscheinwerfers vom Typ ARRI L7C.. ..	24
Abbildung 18: Chemischer Prozess innerhalb einer Leuchtdiode.	29
Abbildung 19: Aufbau einer T-Typ LED.	29
Abbildung 20: Aufbau einer SMD-LED.	30
Abbildung 21: Aufbau einer Superflux-LED.	30
Abbildung 22: Aufbau einer COB-LED.....	31
Abbildung 23: LED-ARRAY mit vielen COB-LEDs.....	32
Abbildung 24: Weißlicht durch eine UV-LED mit verscheiden Farbstoffen.	34

Abbildung 25: Funktionsweise einer MULTI-LED mit drei LED-Chips.....	34
Abbildung 26: Spektrum einer MULTI-LED (3200 K).	35
Abbildung 27: Funktionsweise einer LUMINESZENZKONVERSIONS-LED.	35
Abbildung 28: Spektrum einer LUMINESZENZKONVERSIONS-LED (3200 K).....	36
Abbildung 29: Spektrum eines LED-ARRAYs (RGB+W mit 3200 K).....	36
Abbildung 30: CIE-Normfarbtafel mit den Spektrumsbereichen der einzelnen Verfahren.	37
Abbildung 31: Binnig-Verfahren bei LED-Herstellern.	38
Abbildung 32: Einteilung der Farbklassen in die CIE-Normfarbtafel.....	38
Abbildung 33: Temperaturverhalten verschiedener LED-Farben.	39
Abbildung 34: Entwicklung der Effizienz der LED-Technologien.....	41
Abbildung 35: Marktentwicklung der Einsatzgebiete durch LED.	45
Abbildung 36: Konventioneller Stufenlinsenscheinwerfer vom Typ ARRI 650Plus.....	50
Abbildung 37: Spektralmessung mit Farbwiedergabeindex von ARRI.	51
Abbildung 38: Ansicht eines ARRI L7C.	52
Abbildung 39: Spektralmessung mit Farbwiedergabeindex von ARRI.	53
Abbildung 40: Spektralmessung mit TLCI-Messung von Alan Roberts.	53
Abbildung 41: Colorchecker mit 24 Farbproben.....	55
Abbildung 42: Testaufbau mit Stufenlinsenscheinwerfern im Fernsehstudio der Hochschule Mittweida.	55
Abbildung 43: Testaufbau mit Stufenlinsenscheinwerfern im Fernsehstudio der Hochschule Mittweida (technisch).	56
Abbildung 44: Waveformmonitor mit Parade Darstellung im YRGB-Farbmodell einer Farbreihe des Colorcheckers. Am Beispiel eines Weißabgleichs.....	57
Abbildung 45: Licht- und Farbmessung für reproduzierbare numerische Aussagen.	62
Abbildung 46: Bearbeitungsfolge zur Ermittlung des Farbwiedergabeindex der 24 Colorcheckerfarben bei Referenz- und Vergleichsscheinwerferlicht.....	66
Abbildung 47: Programmtechnische Umrechnungsschritte.....	66
Abbildung 48: Zusammenfassung der Farbwiedergabeindex R_a für die 11 Vergleiche zwischen Referenz- und Vergleichsscheinwerfer.....	67
Abbildung 49: Auswertungsdiagramm mit Farbwiedergabeindex R_a für die Vergleiche 1, 8, 9 und 10 zwischen Referenz- und Vergleichsscheinwerfer.	68

Abbildung 50: Farbwiedergabeindex R_a für die Vergleiche 1, 7; 2, 5 und 3, 2 zwischen Referenz- und Vergleichsscheinwerfer.	71
Abbildung 51: Schattenbildung der Stufenlinsenscheinwerfer (links ARRI 650Plus, rechts ARRI L7C).	75
Abbildung 52: Allgemeine Berechnungsformel für R_a	XXIV
Abbildung 53: Formel zur Berechnung der Lichtdichte.	XXIV
Abbildung 54: Formel zur Berechnung der Lichtausbeute.	XXV
Abbildung 55: Formel zur Berechnung der Lichtmenge.	XXV
Abbildung 56: Formel zur Berechnung des Kontrastwiedergabefaktors.	XXV
Abbildung 57: Formel zur Berechnung der elektrischen Stromstärke.	XXVI
Abbildung 58: Formel zur Berechnung der elektrischen Spannung.	XXVI
Abbildung 59: Formel zur Berechnung der elektrischen Leistung.	XXVI
Abbildung 60: Spektralmessung mit TLCI-Messung von Alan Roberts.	XXXVII
Abbildung 61: Aufbau eines selbstentwickelten Colorcheckers.	XLII
Abbildung 62: Bedingte Formatierung der Delta E-Werte.	XLII
Abbildung 63: Selbstentwickelter Colorchecker des Test 1.	XLIII
Abbildung 64: Farbdifferenzen Delta E für Test 1.	XLIII
Abbildung 65: Selbstentwickelter Colorchecker des Test 2.	XLIV
Abbildung 66: Farbdifferenzen Delta E für Test 2.	XLIV
Abbildung 67: Selbstentwickelter Colorchecker des Test 3.	XLV
Abbildung 68: Farbdifferenzen Delta E für Test 3.	XLV
Abbildung 69: Selbstentwickelter Colorchecker des Test 4.	XLVI
Abbildung 70: Farbdifferenzen Delta E für Test 4.	XLVI
Abbildung 71: Selbstentwickelter Colorchecker des Test 5.	XLVII
Abbildung 72: Farbdifferenzen Delta E für Test 5.	XLVII
Abbildung 73: Selbstentwickelter Colorchecker des Test 6.	XLVIII
Abbildung 74: Farbdifferenzen Delta E für Test 6.	XLVIII
Abbildung 75: Selbstentwickelter Colorchecker des Test 7.	XLIX
Abbildung 76: Farbdifferenzen Delta E für Test 7.	XLIX

Abbildung 77: Selbstentwickelter Colorchecker des Test 8.....	L
Abbildung 78: Farbdifferenzen Delta E für Test 8.	L
Abbildung 79: Selbstentwickelter Colorchecker des Test 9.....	LI
Abbildung 80: Farbdifferenzen Delta E für Test 9.	LI
Abbildung 81: Selbstentwickelter Colorchecker des Test 10.....	LII
Abbildung 82: Farbdifferenzen Delta E für Test 10.	LII
Abbildung 83: Selbstentwickelter Colorchecker des Test 11.....	LIII
Abbildung 84: Farbdifferenzen Delta E für Test 11.	LIII
Abbildung 85: Mittelwert der Farbdifferenzen Delta E der Tests 2 und 5.....	LIV
Abbildung 86: Mittelwert der Farbdifferenzen Delta E der Tests 1 und 7.....	LIV
Abbildung 87: Mittelwert der Farbdifferenzen Delta E der Tests 1, 2, 3, 5, 7.....	LV
Abbildung 88: Kumulierter Mittelwert der Farbdifferenzen Delta E der Tests 1, 2, 3, 5, 7.....	LV

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Spektralverteilung des sichtbaren Lichtes.	4
Tabelle 2: Normfarbwerte der CIE.	6
Tabelle 3: Charakteristische Lichtfarben nach DIN 55035.	7
Tabelle 4: Typische Farbtemperaturen verschiedener Lichtquellen.	8
Tabelle 5: Normfarbmaßzahlen der Normlichtarten der CIE.	9
Tabelle 6: Farbwiedergabeindex mit Farbwiedergabestufe einiger bekannter Lichtquellen...10	
Tabelle 7: Bewertungstabelle für den Metamerie-Index.	12
Tabelle 8: Messgeräte der Lichttechnik.	15
Tabelle 9: Vorteile von Halogenglühlampen.	18
Tabelle 10: LIF-Code für Leuchtmittel.....	21
Tabelle 11: Ausführungen von PAR-Scheinwerfern.....	22
Tabelle 12: Die wichtigsten Schutzkennzeichnungen für Lichtquellen.	25
Tabelle 13: Wichtige Parameter einer Leuchtdiode.	40
Tabelle 14: Vorteile der LED-Technologie.	42
Tabelle 15: Nachteile der LED-Technologie.	43
Tabelle 16: Einsatzgebiete und Anwendungsbeispiele der LED-Lichttechnologie	44
Tabelle 17: Marktüberblick über LED-Stufenlinsenscheinwerfer für einen möglichen Fernsehstudioeinsatz.	46
Tabelle 18: Technische Daten des ARRI 650 Plus.	50
Tabelle 19: Photometrischen Daten des ARRI 650Plus.....	51
Tabelle 20: Technische Daten des ARRI L7C.	52
Tabelle 21: Photometrischen Daten des ARRI L7C.	52
Tabelle 22: Vergleichstests zwischen Referenzscheinwerfern und Vergleichsscheinwerfern mit Vergleichsbedingungen und Zielsetzung.	59

Tabelle 23: Messergebnisse von Temperatur, Abstand, Farbtemperatur, Spannung und Strom.	60
Tabelle 24: Bewertungstabelle für das TLCI-Verfahren.	65
Tabelle 25: Technische Parameter des ARRI 650Plus und ARRI L7C im Vergleich.	72
Tabelle 26: Beispielrechnung für Einsparungen durch den Austausch/Einsatz mit LED-Stufenlinsenscheinwerfern.	73
Tabelle 27: Wesentliche Eigenschaften der bedeutendsten Leuchtmittel für Fernsehstudios.	XXVII
Tabelle 28: Materialsysteme der LEDs verschiedener Farben.	XXX
Tabelle 29: Einteilung der Verfahren für Kamerasensoren.	XXXIII
Tabelle 30: Technische Daten des ARRI True Blue T1.	XXXIV
Tabelle 31: Photometrischen Daten des ARRI True Blue T1.	XXXIV
Tabelle 32: Technische Daten des Quartzcolor Polaris.	XXXV
Tabelle 33: Photometrischen Daten des Quartzcolor Polaris.	XXXV
Tabelle 34: Technische Daten des ARRI L7T.	XXXVI
Tabelle 35: Photometrischen Daten des ARRI L7T.	XXXVI

Vorwort und Danksagung

In bereits von mir absolvierten Praktika und Praxiseinsätzen bei Veranstaltungen sowie Film- und Fernsehproduktionen musste ich feststellen, dass die jeweilige Beleuchtungstechnik einen beträchtlichen Energiebedarf und voluminösen Umfang verursacht.

Der Aufwand für den Transport und die Montage der schweren energieintensiven Scheinwerfer und die unendlichen Starkstromkabelleitungen ließen in mir die Frage aufkommen, ob neuartige LED-Technologien nicht enorme Energie- und Kosteneinsparungen sowie Arbeitsentlastungen während des Aufbaus mit sich bringen könnten.

Diese Frage bewegte mich so sehr, dass ich fortan das Thema verfolgte, von Farbwiedergabeproblemen und Leistungsgrenzen der LED-Lichttechnologie erfuhr und auf Grund dessen das Thema als Bachelorarbeit vorschlug.

In meinen beiden Hochschulbetreuern, Herr Prof. Dr.-Ing. Wilfried Schmalwasser und Prof. Dr.-Ing. Rainer Zschockelt, aber auch in meinen sehr engagierten Praxispartnern Herrn Dipl. Ing. Dennis Jackstien und Herrn Uwe Gebauer fand ich hierbei, dankenswerterweise, eine sehr umfangreiche Unterstützung.

Dafür bedanke ich mich bei allen Beteiligten.

Konrad Dietze

1 Einleitung

Die stürmische Entwicklung der LED-Technologie in den letzten Jahren brachten viele Einsatzgebiete u.a. im Automobilbereich und der Straßen-, Architektur- und Heimbeleuchtung mit sich. Jedoch auch in der Beleuchtung von Fernseh-, Film- und Fotostudios sowie Museums finden LED-Technologien schrittweise in Form von verschiedenen Scheinwerfertypen Anwendung. In der Literatur stehen gegenwärtig noch vorrangig die Farbwiedergabequalität, die Leistungsparameter sowohl die Temperaturabhängigkeit von LED-Leuchten zur kritischen Diskussion.

Die vorliegende Arbeit soll die Möglichkeiten und Parameter von neuartigen LED-Leistungsscheinwerfern in Fernsehstudios aufzeigen. Hierbei sind Vergleiche zu bisher verwendeten konventionellen Halogenscheinwerfern herzustellen. Die Arbeit wird sich schwerpunktmäßig auf Stufenlinsenscheinwerfer konzentrieren, da diese vorrangig im Studiobetrieb zum Einsatz kommen.

Im zweiten Teil der Arbeit werden die Grundlagen und Grundbegriffe der Lichttechnik und Beleuchtung in Fernsehstudios dargestellt. Dabei werden die Grundbegriffe des lichttechnischen Raumes, welcher durch die Studiobeleuchtung entsteht und durch die Kamera aufgenommen wird, beschrieben. Des Weiteren sollen die verschiedenen Leuchtmittel und Lichtquellen bzw. Scheinwerfertypen der Studiobeleuchtung im Überblick beschrieben werden.

Im dritten Teil der Arbeit werden die Funktionsweise, der Aufbau, die Chancen und Risiken sowie die möglichen Einsatzgebiete der LED-Lichttechnologie aufgezeigt. Weiterhin sollen der Stand und die Entwicklung der LED-Lichttechnologie bei neuartigen Studioscheinwerfern beschrieben werden.

Im vierten Teil der Arbeit soll die bisherige konventionelle Studiolichttechnik mit der neuartigen LED-Studiolichttechnik, am Beispiel von Stufenlinsenscheinwerfern, verglichen werden. Der Vergleich wird mit repräsentativen und für den Test verfügbaren Stufenlinsenscheinwerfern im Fernsehstudio der HSMW durchgeführt. Hierbei sollen vor allem die Unterschiede der Farbwiedergabeparameter zwischen herkömmlichen Halogenstufenlinsenscheinwerfern und LED-Stufenlinsenscheinwerfern untersucht werden. Dafür werden geeignete Vergleichsmethoden und ein selbst entwickelter Versuchsaufbau bzw. -ablauf verwendet.

Die Bewertung der Farbwiedergabeparameter soll mit Hilfe einer verfügbaren Studiokamera durch Auswertung der RGB-Signale erfolgen. Dabei wird auf die Entwicklung und die Fortschritte dieser Fernsehameratechnik, im Besonderen die Kameraaufnahmechips, in der vorliegenden Arbeit nicht näher eingegangen. Sie dient lediglich als Messmittel, um die lichttechnischen Parameter zu erfassen.

In der abschließenden Auswertung der Vergleichstests sollen die Vor- und Nachteile von LED-Stufenlinsenscheinwerfern herausgearbeitet werden. Außerdem wird versucht, einen Beweis zu erbringen, dass die Farbwiedergabeparameter, die Leistungsparameter sowie die Temperaturabhängigkeit von LED-Stufenlinsenscheinwerfern gleich oder günstiger als Halogenstufenlinsenscheinwerfer sind.

Hierbei soll die von Mathias Geck im Jahre 2011 aufgezeigte Feststellung - *„Der kritische Punkt der Farbwiedergabequalität soll laut Angaben von Hersteller ARRI mit einem CRI von über 90 auf einem sehr hohen Niveau liegen. Es ließen sich allerdings zu diesem Zeitpunkt nach intensiver Recherche keine unabhängigen Studien finden, welche diese Werte bestätigen.“*¹ - weiterführend untersucht werden.

Es soll der Nachweis erbracht werden, dass LED-Stufenlinsenscheinwerfer bereits heute eine kosten- und energiegunstige Ablösevariante für bisherige konventionelle Halogenstufenlinsenscheinwerfer sind.

Ein Ausblick über perspektivisch weiterführende Untersuchungen und Aufgaben soll die vorliegende Arbeit abschließen.

¹ Geck 2011, S. 31

2 Grundlagen und Grundbegriffe der Lichttechnik und Beleuchtung in Fernsehstudios

„Licht ist für den Menschen von grundsätzlicher Bedeutung. Ohne das natürliche Licht der Sonne wäre auf unsere Erde erst gar kein Leben entstanden. Licht ... beeinflusst das Wohlbefinden und die Stimmung des Menschen“²

Licht ist für diverse Beleuchtungssituationen zum Ausleuchten, beispielsweise des Aufnahmerraums einer Filmproduktion bzw. der Bühne eines Fernsehstudios, unabdingbar. Deshalb beschäftigt sich das folgende Kapitel grundlegend mit den Eigenschaften von Licht und dessen Parametern. Weiterhin werden die lichttechnischen Größen und Einheiten sowie die Grundlagen der Farbmessung dargelegt. Hierbei wird auf die Grundlagen der Optik und ihrer Parameter sowie auf die Farbmetrik nur kurz eingegangen. Abschließend werden die Grundlagen bzw. Grundbegriffe der Beleuchtung in Fernsehstudios an Hand von den dort üblicherweise verwendeten Lichtquellen bzw. Scheinwerfertypen und dessen Leuchtmittel erläutert.

2.1 Grundlagen und Grundbegriffe der Lichttechnik

Elektrisches Licht für Straßen-, Wohnungs- und Studiobeleuchtung war in der Vergangenheit nicht immer selbstverständlich. Unsere Vorfahren waren bei Nacht, einer Finsternis ausgesetzt, die es heutzutage in dieser Form nur noch selten gibt. Dies änderte sich im Jahre 1801 durch die Erkenntnis von Louis Jacques Thénard, dass man Metalldrähte durch den galvanischen Strom zur hellen Glut bringen kann.³ Weiterhin revolutionierte die Erfindung der Glühbirne 1854 durch Heinrich Göbel⁴ und die industriell vermarktete Weiterentwicklung von Thomas Alva Edison⁵ das Leben auf der Erde und legte den Grundstein für die heutige Fernsehstudiobeleuchtung. Später folgten dann die Gasentladungslampen, die Leuchtstofflampen und die Halogenglühlampen.⁶ Wissenschaftler forschten fortan an der Entwicklung der neuartigen Technologie und veränderten somit fortlaufend das Bild dieses Planeten. Diese Technologie sorgte dafür, dass der Tag bis in die Nachtstunden ausgedehnt werden konnte. Die neusten Errungenschaften der Menschen in Sachen Licht ist unter anderem die LED. Dies ermöglicht neue Beleuchtungssysteme in Film- und Fernsehstudios und ist somit heutzutage nicht mehr wegzudenken.

² Zieseniß et al. 2009, S.14

³ Vgl. <http://de.wikipedia.org/wiki/Gl%C3%BChlampe> [Stand: 05.01.2014]

⁴ Vgl. <http://www.wissen.de/wer-erfand-die-gluehbirne> [Stand: 05.01.2014]

⁵ Vgl. http://de.wikipedia.org/wiki/Thomas_Alva_Edison [Stand: 05.01.2014]

⁶ Vgl. Ris 2003, S. 15

2.1.1 Licht und Farbe

Im Folgenden sollen die wesentlichsten Parameter von Licht und Farbe beschrieben werden.

▪ Strahlung, Wellenlänge und Spektrum

Licht wird oftmals als eine Strahlung bezeichnet. In erster Linie ist Licht eine Form von Energie und überträgt bei Ausstrahlung elektromagnetische Strahlung. Diese Ausstrahlung erfolgt mit einer bestimmten Ausbreitungsgeschwindigkeit (m/s) und schwingt in einer bestimmten Frequenz (Hz) pro Medium. Dividiert man diese beiden Parameter erhält man die Wellenlänge (λ in nm) der Strahlung, z.B. die der optischen Strahlung. Diese ist wiederum nur ein kleiner Teil aller elektromagnetischen Wellen (siehe Abb. 1) und bewegt sich im Bereich 1nm bis zu 1mm. In diesem Bereich der Strahlung ist das sichtbare Licht, die Infrarotstrahlung (IR) und die Ultraviolettstrahlung (UV) zu finden (siehe Tab. 1).⁷

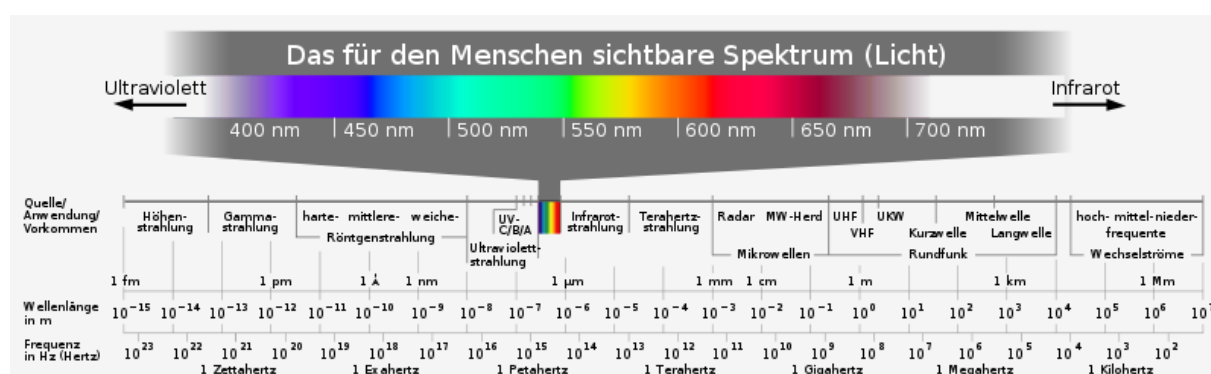


Abbildung 1: Verteilung der elektromagnetischen Wellen des Lichtes mit dem Spektrum des sichtbaren Lichtes.⁸

Ultraviolettstrahlung	100 nm bis 380 nm
Sichtbares Licht	380 nm bis 780 nm
Infrarotstrahlung	780 nm bis 1 mm

Tabelle 1: Spektralverteilung des sichtbaren Lichtes.⁹

In diesem sichtbaren Strahlungsspektrum von 380 nm bis 780 nm befindet sich jede Farbe, die wir mit unserem menschlichen Auge wahrnehmen können. Dieses Spektrum lässt sich an Hand von Transmissions- oder Reflexions- bzw. Remissionskurven in einem Diagramm darstellen und beschreiben. Die Werte für diese Kurven werden bei der Zerlegung von Licht durch lichttechnische Messgeräte wie z.B. ein Spektrometer erzeugt. Durch das Eintragen und miteinander Verbinden der gemessenen Werte über den sichtbaren Wellenlängenbereich erhält man die sog. spektrale Remissionskurve (siehe Abb. 2).¹⁰

⁷ Vgl. Grosch 2009, S. 5

⁸ http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electromagnetic_spectrum_c.svg [Stand: 05.01.2014]

⁹ Vgl. Loos 1989, S. 26

¹⁰ Vgl. Loos 1989, S. 75

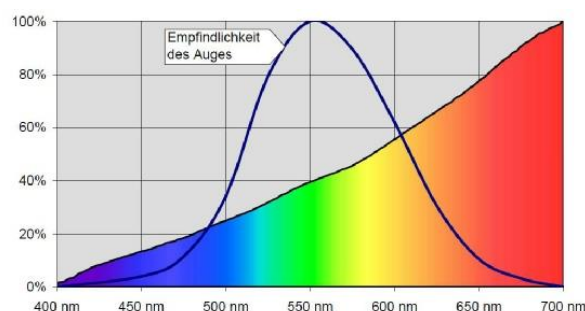


Abbildung 2: Beispielhaft die Spektrale Remissionskurve von Halogenlampen und die Empfindlichkeit des menschlichen Auges.¹¹

Dadurch kann man bei verschiedenen Lichtquellen mit vollem Spektrum (Weiß) verschiedene Remissionskurven messen. Zum Beispiel erhält man kontinuierliche Lichtspektren (siehe Abb. 2) unter anderem bei Halogenglühlampen (Kontinuumstrahler) bzw. Bandenspektren oder Linienspektren bei z.B. Quecksilberdampflampen oder Energiesparlampen (Linienstrahler).¹² Die folgende Abb. 3 zeigt als Beispiel eines Linienstrahlers die spektrale Remissionskurve einer Energiesparlampe.

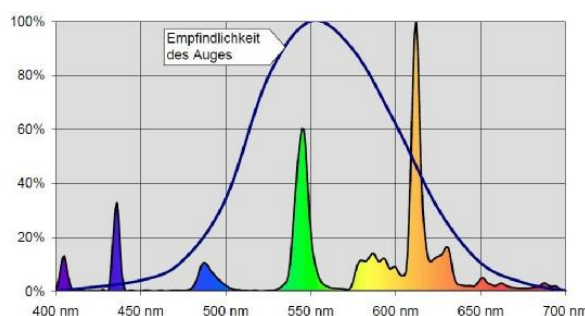


Abbildung 3: Beispielhaft die Spektrale Remissionskurve einer Energiesparlampe und die Empfindlichkeit des menschlichen Auges.¹³

Grundlegend wird diese linienartige Verteilung des sichtbaren Farbspektrums durch die monochromatische Strahlung eines Leuchtmittels erzeugt. Die Zuordnung und Vergleichbarkeit hängt somit von den spektralen Anteilen des jeweiligen Leuchtmittels in einer Lichtquelle ab.

Da bestimmte Farben in diesem Spektrum nur schwer abzugrenzen sind, hat die Commission Internationale de l'Eclairage (CIE, Internationale Beleuchtungskommission) 1931 ein Normvalenzsystem entwickelt. Unter diesem Normvalenzsystem versteht man eine international vereinbarte Methode der Farbkennzeichnung auf der Basis der additiven Farbmischung nach DIN 5033 Teil 2.¹⁴ Dabei definiert man einheitliche Primärvalenzen bzw. Normvalenzen

¹¹ <http://www.hbernstaedt.de/knowhow/licht/lichtsehen/lichtsehen.htm> [Stand: 13.02.2014]

¹² Vgl. Loos 1989, S. 30

¹³ <http://www.hbernstaedt.de/knowhow/licht/lichtsehen/lichtsehen.htm> [Stand: 13.02.2014]

¹⁴ Vgl. <http://www.farbe.com/cie01.htm> [Stand: 13.02.2014]

durch spezielle Wellenlängen (siehe Tab. 2) und einen farbmesstechnischen Normalbeobachter.

Blau	435,8 nm
Grün	546,1 nm
Rot	700,0 nm

Tabelle 2: Normfarbwerte der CIE.¹⁵

Es handelt sich hierbei um ein rein mathematisches System zur Ermittlung dieser Normvalenzen.¹⁶

▪ Farbdreieck, CIE Normvalenzsystem und CIE-XYZ-Farbraum

Dieses o.g. Normvalenzsystem oder CIE-Normfarbsystem stellt nach DIN 5033-Teil 2 eine Relation zwischen der menschlichen Farbwahrnehmung (Farbe) und den physikalischen Ursachen des Farbreizes (Farbvalenz) her. Diese mathematische Metrik wurde somit entwickelt, um Farben exakt beschreiben zu können.¹⁷ Es erfasst dabei die Gesamtheit wahrnehmbarer Farben und wird somit in der sog. CIE-Normfarbtafel dargestellt (siehe Abb. 4).

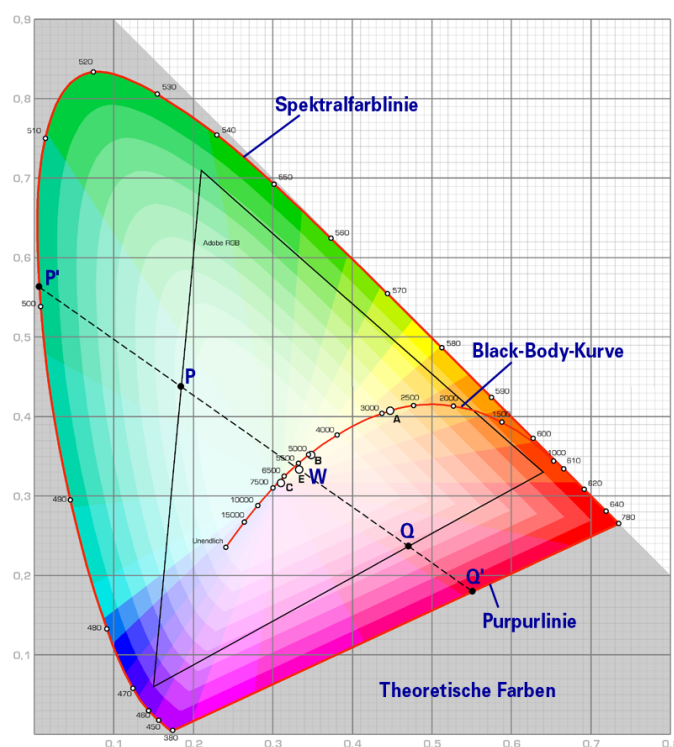


Abbildung 4: CIE-Normfarbtafel mit der sog. Black-Body-Kurve.¹⁸

¹⁵ Vgl. Ebd.

¹⁶ Vgl. http://www.elv.de/Vom-Licht-zur-Beleuchtung-Teil-2-Licht-und-Farbe/x.aspx/cid_726/detail_36948/print_1 [Stand: 13.02.2014]

¹⁷ Vgl. Zieseniß et al. 2009, S.24

¹⁸ http://de.wikipedia.org/wiki/CIE-Normvalenzsystem#Die_Normfarbtafel [Stand: 05.01.2014]

Grundsätzlich können alle Farben durch Mischung von drei Grund- bzw. Primärfarben (Farbfernsehen) hergestellt werden, wenn sich keiner dieser drei Primärfarben durch die anderen beiden mischen lässt. Damit lässt sich nun jede Farbe durch drei Maßzahlen mit den Farben Rot, Grün und Blau in der o.g. CIE-Normfarbtafel darstellen.¹⁹

Diese hufeisenförmige Fläche der CIE-Normfarbtafel beruht auf dem x- und y-Anteil einer beliebigen Farbe P. Durch die Grundbedingung $x + y + z = 1$ lässt sich der z-Anteil jeweils rechnerisch ($z = 1 - x - y$) ermitteln und laut Angaben der CIE in eine Ebene als Farbdreieck darstellen.²⁰

Dieses enthält eine Kurve mit allen für den Menschen sichtbaren Spektralfarben (gemäß Abb. 1) und eine sog. Purpurgerade als Verbindungslinie zwischen Blau und Rot. In der Mitte liegt der Unbuntpunkt (W = Weiß) mit den Koordinaten $x=y=0,333$. Je weiter eine Farbkoordinate vom Zentrum entfernt ist, desto höher ist seine farbliche Sättigung.²¹ Somit können alle Farben durch die Angaben der Normfarbwertanteile x und y im CIE-XYZ bzw. xyY-Farbraum²² in der CIE-Normfarbtafel beschrieben werden.²³

▪ Lichtfarbe

Die Farbe einer Lichtquelle wird als Lichtfarbe bezeichnet, die durch die farbmetrische Größe bestimmt werden kann.²⁴ Diese Lichtfarbe kennzeichnet den Farbeindruck, den wir an einer Lichtquelle wahrnehmen (siehe Tab. 3).

Lichtquelle	Farbtemperatur in Kelvin
Warmweiß	unter 3300 K
Neutralweiß	3300 K bis 5300 K
Tageslichtweiß (auch Kaltweiß)	über 5300 K

Tabelle 3: Charakteristische Lichtfarben nach DIN 55035.²⁵

Erhitzt man z.B. einen Wolframfaden einer Glühlampe kontinuierlich, so leuchtet er anfänglich rötlich, dann gelblich und schließlich weiß. Der Physiker Max Planck hat diese Art von Strahlung, die sog. Temperaturstrahlung, durch mathematische Formeln beschrieben (Plancksches Strahlungsgesetz).²⁶

¹⁹ Vgl. Ris 2003, S. 38

²⁰ Vgl. Loos 1989, S. 58

²¹ Vgl. Ris 2003, S. 38

²² <http://www.copysshop-tips.de/luf06.php> [Stand: 05.01.2014]

²³ Vgl. Zieseniß et al. 2009, S.24

²⁴ Vgl. Loos 1989, S.28

²⁵ Vgl. Zieseniß et al. 2009, S.24

²⁶ Vgl. Ebd.

▪ Farbtemperatur

Die Farbtemperatur (Kelvin, K) beschreibt die Farbe einer Lichtquelle bei deren Betriebstemperatur. Durch das o.g. Plancksche Strahlungsgesetz definiert Max Planck seine Plancksche Kurve (engl. Black-Body-Kurve) oder auch „schwarzen Strahler“ genannt, im Farbspektrum der CIE-Normfarbtafel (siehe Abb. 4) nach DIN 5033.²⁷ Als schwarzer Strahler bezeichnet man alle Lichtquellen, die sich entlang dieses Planckschen Kurvenzuges bewegen. Vergleichsobjekt ist hierbei ein Schwarzer Körper (glühendes Titan)²⁸, der bei bestimmten Temperaturen erhitzt, ganz bestimmte Farben annimmt.²⁹ Je heißer der schwarze Körper ist, umso größer ist bei kürzeren Wellenlängen die relative Intensität. Ein kalter Körper strahlt fast ausschließlich im Infraroten (300 K). Wenn er erhitzt wird, beginnt er rot zu glühen. Weiteres Erhitzen kann ihn gelb, weiß und sogar blau erscheinen lassen (5800 K).³⁰ Alle so bestimmten Farben liegen auf der o.g. Black-Body-Kurve in der o.g. CIE Normfarbtafel.³¹

Beispielsweise Halogenglühlampen (siehe 2.2.1) verlaufen nur einen Teil entlang dieser Kurve, weil Sie eine Farbtemperatur von 3200 K besitzen und der Glühdraht bei 3600 K schmilzt.³² Mit dem Verfahren des o.g. schwarzen Strahlers lassen sich jedoch auch die Lichtfarben oberhalb der Schmelztemperaturen von Wolfram beschreiben.

Weiterhin gilt, wenn eine Farbe einer Lichtquelle in der CIE-Normfarbtafel auf oder dicht neben dieser Black-Body-Kurve liegt, so kann man diese durch die Temperatur, die zu der Kurve an dieser Stelle gehört, kennzeichnen. Diese Temperatur wird als ähnlichste Farbtemperatur T_n der jeweiligen Lichtquelle bezeichnet³³ (siehe Tab. 4) und mit der sog. Judd'schen Gerade in der CIE-Normfarbtafel beschrieben.³⁴ Diese Judd'sche Gerade stellt somit eine Erweiterung bzw. Ergänzung des Planckschen Kurvenzuges dar.

Farbtemperatur	Lichtquelle
1.500 K	Kerze
2.700 K	Glühlampe (100 W)
3.200 K	Halogenglühlampe
4.000 K	Leuchtstofflampe (Neutralweiß)
5.000 K	Morgen- und Abendsonne
5.600 K	Halogen-Metall dampflampen
20.000 K	Blauer Himmel

Tabelle 4: Typische Farbtemperaturen verschiedener Lichtquellen.³⁵

²⁷ Vgl. Ackermann 2006, S. 15

²⁸ Vgl. <http://de.wikipedia.org/wiki/Farbtemperatur> [Stand: 05.01.2014]

²⁹ Vgl. Ris 2003, S. 36

³⁰ Vgl. Loos 1989, S.28

³¹ Vgl. Zieseniß et al. 2009, S.24

³² Vgl. Ackermann 2006, S. 16

³³ Vgl. Zieseniß et al. 2009, S.24

³⁴ Vgl. <http://www.techniklexikon.net/d/juddsche-geraden/juddsche-geraden.htm> [Stand: 06.01.2014]

³⁵ Vgl. Ris 2003, S. 36

In der Beleuchtung von Fernsehstudios mit Scheinwerfern, kann man diese Farbtemperatur mit sog. Farbfilterfolien in verschiedenen Abstufungen (z.B. Change to Orange: Full to 1/8) angleichen.

Die Farbtemperaturen, welche die gleiche relative Strahlenverteilung, wie der Plancksche Strahler besitzen, bezeichnet man als Normlichtarten.³⁶

▪ Lichtart und Normlichtarten

„Licht mit einer festgelegten Energiestrahlung und einer relativen spektralen Strahlungsverteilung wird als Lichtart bezeichnet. In der Farbmimetrik werden genormte Lichtarten verwendet, die als „Normlichtarten“ gekennzeichnet sind. Zurzeit gibt es die Normlichtarten A, C und D₆₅, darüber hinaus noch viele weitere, z.B. für Leuchtstofflampen. Die Normlichtarten und Lichtarten sind mit ihrem Zahlenwert (Normfarbmaßzahlen und abgeleiteten Größen) auf den 2° Normalbeobachter oder den 10° Normalbeobachter bezogen (siehe Tab. 5).“³⁷

Normlichtart	Farbtemperatur	Normfarbmaßzahl					
nach CIE	in Kelvin	X _c 2°	Y _c 2°	Z _c 2°	X _c 10°	Y _c 10°	Z _c 10°
A	2856	109.85	100.00	35.58	111.14	100.00	35.20
C	6800	98.04	100.00	118.10	97.28	100.00	116.145
D ₆₅	6504	95.02	100.00	108.82	94.11	100.00	107.30

Tabelle 5: Normfarbmaßzahlen der Normlichtarten der CIE.³⁸

„Dieser „gemittelte“ Beobachter blickt auf eine Fläche mit einem Sichtfeld von 2° mittig zur Hauptblickrichtung. Dieses Feld hat etwa die Größe einer 1-Euro-Münze, die man mit ausgestrecktem Arm vor sich hält. Diese Begrenzung wurde von der CIE 1931, aus der Größe der Zone der höchsten Dichte der farbempfindlichen Photorezeptoren im Auge, abgeleitet.“³⁹

„Die CIE empfiehlt seit 1964 den 10° Normalbeobachter, weil dies sich seither in der Praxis immer mehr durchsetzt. Zumal das größere Gesichtsfeld und die daraus sicher ergebenden Normfarbmaßzahlen mit dem visuellen Eindruck einer Farbe besser übereinstimmen.“⁴⁰

▪ Farbmischung

Es wird zwischen subtraktiver und additiver Farbmischung unterschieden. Die additive Farbmischung liegt dann vor, wenn Farbreize optisch durch Lichtfarben gemischt werden. Ein Mischen von Lichtfarben bedeutet, dass durch das Auge mehrere Strahlungen gleichzeitig oder schnell nacheinander wahrgenommen werden. Die additive Farbmischung spielt im Farbfernsehen sowie bei der Reproduktion des Kamerabildes auf dem Kamerasensor und weiterführend in der Studiobeleuchtung eine sehr entscheidende Rolle. Die subtraktive Farbmischung jedoch ist eine physikalische Kombination der Spektralanteile der Farbmittel

³⁶ Vgl. Loos 1989, S. 28

³⁷ Vgl. Ebd.

³⁸ Vgl. Loos 1989, S. 188 ff.

³⁹ <http://de.wikipedia.org/wiki/CIE-Normvalenzsystem> [Stand: 06.01.2014]

⁴⁰ Vgl. Loos 1989, S. 58

durch Remission bei Reflexion von der Oberfläche eines Körpers oder durch Transmission beim Durchgang durch ein Medium.⁴¹

▪ Farbwiedergabe

Farbwiedergabe ist ein wichtiger Aspekt der künstlichen Beleuchtung. Je nach Art der Beleuchtung zeigt ein Körper eine entsprechende Farbe. In bestimmten Situationen sollten Farben so natürlich wie möglich wiedergegeben werden (z.B. beim Farbfernsehen).⁴² Eine farbfarbige beleuchtete Fläche wird jedoch von zwei Lichtquellen mit unterschiedlicher spektraler Zusammensetzung, aber augenscheinlich gleich weißem Licht, jeweils unterschiedlich dargestellt. Dies liegt daran, dass die Fläche die jeweils in der Lichtquelle enthaltenen Wellenlängen nicht in gleichem Maße reflektiert, somit ändern sich der Farbeindruck und die Farbwiedergabe.

▪ Farbwiedergabeindex R_a

Diese o.g. Änderung des Farbeindrucks bzw. der Farbwiedergabe kann mit dem Farbwiedergabeindex beschrieben werden.

„Unter Farbwiedergabeindex (eng. Colour Rendering Index, CRI) versteht man eine photometrische Größe, mit der sich die Qualität der Farbwiedergabe von Lichtquellen gleicher korrelierter Farbtemperatur beschreiben lässt. Die abgekürzte Schreibweise für den Farbwiedergabeindex ist R_a .“⁴³ Dieser Farbwiedergabeindex R_a wird wie in Anlage A dargestellt berechnet.

Für Lichtquellen in farbkritischer Umgebung, wie in Fernsehstudios, wird ein $R_a > 90$, also Farbwiedergabestufe 1A (entsprechend Tab. 6), gefordert.⁴⁴

Lampe	Index	Farbwiedergabestufe
Glühlampe, Halogenglühlampen	bis 100	1A ($R_a > 90$)
LEDs, Energiesparlampen, Halogen-Metall dampflampe	80...95	1B ($R_a = 80-89$)
Standard-Leuchtstofflampe „universalweiß“	75	2A ($R_a = 70-79$)
Standard-Leuchtstofflampe „hellweiß“	65	2B ($R_a = 60-69$)
Quecksilberdampf-Hochdrucklampe	45	3 ($R_a = 40-59$)
Natriumdampf-Hochdrucklampe	25	4 ($R_a = 20-39$)

Tabelle 6: Farbwiedergabeindex mit Farbwiedergabestufe einiger bekannter Lichtquellen.⁴⁵

Eine Lichtquelle mit einer geringen Farbwiedergabe bzw. einem geringen Farbwiedergabeindex besitzt nur einen bestimmten Teil des Spektrums der Strahlung (im schlimmsten Fall Linienstrahler), diese wird somit monochromatische Strahlung genannt.⁴⁶

⁴¹ Vgl. http://de.wikipedia.org/wiki/Subtraktive_Farbmischung [Stand: 06.01.2014]

⁴² Vgl. <http://www.elektro-wissen.de/Elektrotechnik/farbwiedergabe.html> [Stand: 06.01.2014]

⁴³ <http://de.wikipedia.org/wiki/Farbwiedergabeindex> [Stand: 06.01.2014]

⁴⁴ Vgl. Ackermann 2006, S. 17

⁴⁵ <http://www.code-knacker.de/farbwiedergabestufen.htm> [Stand: 06.01.2014]

▪ Farbmessung und Farbmatrik

„Bei der Farbmessung ist es mit aufwendigen Farbmessgeräten möglich, den optischen Eindruck einer Farbe nach Buntton (Farbton), Sättigung, Helligkeit durch drei voneinander unabhängigen (Norm-) Farbmaßzahlen eindeutig festzulegen, sodass jede Farbe in Beziehung zu beispielsweise dem o.g. CIE-Normvalenzsystem steht.“⁴⁷ Die Grundlage dieser Theorie der Farbmessung wurde bereits 1853 durch die Gesetze von Graßmann dargelegt.

Weiterhin erreicht man eine eindeutige Festlegung von Farbmaßzahlen mit Hilfe der Farbmatrik (Metrik = Zusammenhang vom Maßzusammenhang des Raumes). Somit müssen sich alle reellen Farben im Maßsystem unterbringen lassen (niedere Farbmatrik). Außerdem soll das „Maßsystem transformierbar sein, um Farbabstände zahlenmäßig bestimmen, gleiche Farbabstände auch visuell gleich beurteilen und Farbabstände festlegen zu können (höhere Farbmatrik).“⁴⁸

Für die o.g. Bestimmung und Darstellung kann das CIE-Normvalenzsystem bzw. die CIE-Normfarbtafel als internationaler Standard herangezogen werden. Dieses hat bei der Zuordnung und Darstellung dieser ermittelten Farbabstände jedoch erhebliche Schwachpunkte. Wie der Amerikaner Mac Adams herausfand, sind die zahlenmäßig gleich großen Farbabstände in der Normfarbtafel bei unterschiedlichen Farbtönen vom Menschen nicht als gleich groß empfunden wurden. Diese Erkenntnis hat er mit seinen MacAdam-Ellipsen veranschaulicht dargestellt. Weiterhin hat dies zur Folge, dass der CIE-XYZ-Farbraum empfindungsgemäß nicht gleichabständig und somit für die praktische Anwendung der Bewertung von Farbabständen schlecht geeignet ist (siehe Abb. 5).

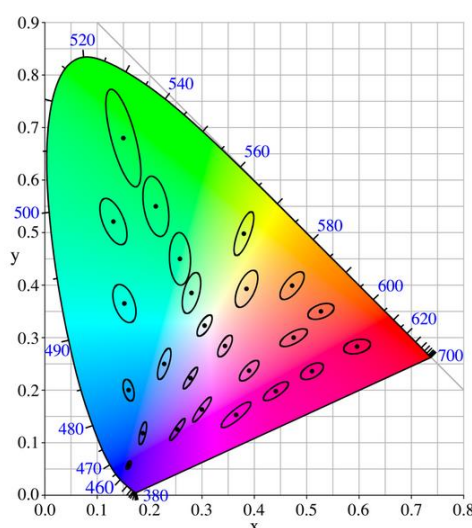


Abbildung 5: CIE-Normfarbtafel mit den sog. MacAdam-Ellipsen.⁴⁹

⁴⁶ Vgl. Zieseniß et al. 2009, S. 16

⁴⁷ Loos 1989, S. 14

⁴⁸ Ebd.

⁴⁹ http://commons.wikimedia.org/wiki/File:CIExy1931_MacAdam.png [Stand: 06.01.2014]

Somit wurde 1976 von der CIE weitere Farbräume aus dem o.g. CIE-XYZ-Farbraum entwickelt, um die empfindungsgemäße Farbcharakterisierung (Gleichabständigkeit) besser darstellen zu können, als in diesem Normvalenzsystem der CIE von 1931. Die bekanntesten Farbräume sind unter anderem der CIELAB-Farbraum und den CIELUV-Farbraum. Auf den CIELUV-Farbraum wird an dieser Stelle nicht weiter eingegangen.

Der o.g. CIELAB-Farbraum „ist ein Farbraum, der den Bereich der wahrnehmbaren Farben abdeckt. Dieser Farbraum ist auf Grundlage der Gegenfarbentheorie konstruiert. Eine der wichtigsten Eigenschaften des $L^*a^*b^*$ -Farbmodells ist seine Geräteunabhängigkeit. Das heißt die Farben werden unabhängig von der Art ihrer Erzeugung und Wiedergabetechnik definiert. Das Farbmodell ist in der EN ISO11664-4 genormt und wird durch ein dreidimensionales Koordinatensystem beschrieben (siehe Abb. 6).“⁵⁰

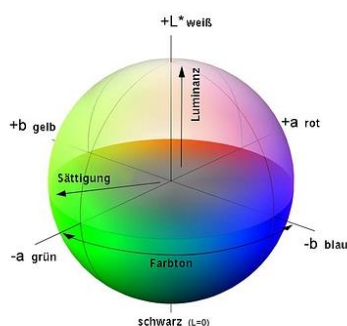


Abbildung 6: Vollständiger CIELAB-Farbraum.⁵¹

Durch den o.g. CIELAB lässt sich nun ein Farbabstand (Delta E) ermitteln. Der Farbabstand Delta E wird als Metamerie-Index verwendet. Das ist der Abstand zwischen den Farbkoordinaten, die jeweils den beiden Farbeindrücken in einem dreidimensionalen Farbraum zugeordnet sind.⁵² Dieser Metamerie-Index Delta E wird in folgenden Abstufungen als gut bzw. schlecht bewertet (siehe Tab. 7).

Delta E	Bewertung
0,0 ... 0,5	kein bis fast kein Unterschied
0,5 ... 1,0	Unterschied kann für das geübte Auge bemerkbar sein
1,0 ... 2,0	unmerklicher Farbunterschied
2,0 ... 4,0	wahrgenommener Farbunterschied
4,0 ... 5,0	wesentlicher Farbunterschied, der selten toleriert wird
> 5,0	die Differenz wird als andere Farbe bewertet

Tabelle 7: Bewertungstabelle für den Metamerie-Index.⁵³

⁵⁰ <http://de.inforapid.org/index.php?search=Gegenfarbtheorie> [Stand: 06.01.2014]

⁵¹ http://www.prontosystems.org/_media/presstec/colormanagement/farbmodelle/lab.jpg [Stand: 07.01.2014]

⁵² Vgl. Loos 1989, S. 169

⁵³ Vgl. Loos 1989, S. 111

Dieser ermittelte Farbabstand aus dem CIELAB-Farbraum ist wiederum in verschiedene Empfehlungen der CIE abgestuft. Unter anderem in den die CIE76, CIE94 und dem aktuellsten CIE2000.

In den Untersuchungen in Kapitel 4 wird die jüngste Empfehlung der Internationalen Beleuchtungskommission der CIE2000 zu Berechnung verwendet. Dieser gilt als empfindungsgemäß gleichabständiger als die anderen o.g. Verfahren. Um die Verwendung des CIELAB-Farbraums mit dem Delta E - CIE2000 zu verdeutlichen, wird im Folgenden der Begriff CIELAB2000 verwendet.

2.1.2 Lichttechnische Größen und Einheiten

Im Folgenden sollen die wesentlichsten in Abb. 7 dargestellten lichttechnischen Größen und Einheiten beschrieben werden. Im Anschluss sind die üblicherweise verwendeten Messgeräte der Lichttechnik kurz aufgeführt. Weiter Ausführungen sind, inklusive Formeln, in der Anlage B zu finden.

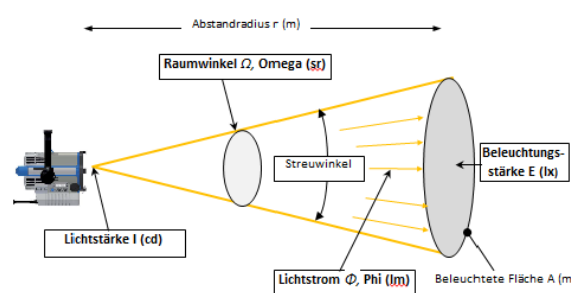


Abbildung 7: Lichttechnische Zusammenhänge und deren Messgrößen.

■ Lichtstrom Φ

Der Lichtstrom ist die lichttechnische Entsprechung zur Strahlungsleistung. Die Strahlungsleistung (auch Strahlungsfluss) ist die Strahlungsenergie, die pro Zeitspanne von elektromagnetischen Wellen transportiert wird.⁵⁴ Wird diese Strahlungsleistung nur auf den sichtbaren Spektralbereich beschränkt, so wird dieser oft als Lichtstrom (Lumen, lm) bezeichnet. Er berücksichtigt die wellenlängenabhängige Empfindlichkeit des menschlichen Auges.⁵⁵

Der Lichtstrom beschreibt somit die „Lichtleistung“⁵⁶ des von einer Lampe in alle Richtungen des Raumes abgegebenen Lichtes.⁵⁷

⁵⁴ Vgl. <http://de.wikipedia.org/wiki/Strahlungsleistung> [Stand: 07.01.2014]

⁵⁵ <http://de.wikipedia.org/wiki/Lichtstrom> [Stand: 08.01.2014]

⁵⁶ Ris 2003, S. 20

⁵⁷ Vgl. Zieseniß et al. 2009, S. 19

$$\Phi_v = K_m \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} \frac{\partial \Phi_e(\lambda)}{\partial \lambda} \cdot V(\lambda) d\lambda$$

Abbildung 8: Formel zur Berechnung des Lichtstroms.⁵⁸

▪ Beleuchtungsstärke E

Die Beleuchtungsstärke (Lux, lx) beschreibt die Menge des auf eine Fläche einfallenden Lichtstroms. Sie nimmt nach dem fotometrischen Entfernungsgesetz bei größer werdendem Abstand quadratisch ab. In einem modern ausgestattenden Fernsehstudio mit modernen Studiokameras reicht eine Beleuchtungsstärke von 700lx vollkommen aus.⁵⁹ In der Praxis kann dieser Wert sogar noch um das vielfache verringert werden. Jedoch sollte diese Beleuchtungsstärke in Fernsehstudios über eine große Fläche konstant gehalten werden, wofür ein großer Lichtkegel und somit große Abstände erforderlich sind. Diese Parameter sind jedoch bauartbedingte Vorgaben eines Scheinwerfers (siehe Kapitel 2.2.2).

$$E_v = \frac{d\Phi_v}{dA_e}$$

Abbildung 9: Formel zur Berechnung der Beleuchtungsstärke.⁶⁰

▪ Lichtstärke I

Die Lichtstärke (Candela, cd) ist die, mit der spektralen Hellempfindlichkeit des Auges (genauer: eines genormten 2° Standard-Beobachters) gewichtet, Strahlungsleistung einer Lichtquelle pro Raumwinkel, sozusagen der Lichtstrom pro Raumwinkel.

$$I_v = \frac{\partial \Phi_v}{\partial \Omega}$$

Abbildung 10: Formel zur Berechnung der Lichtstärke.⁶¹

▪ Raumwinkel Ω

Der Raumwinkel (Steradian, sr) wird durch ein Bündel von einem Punkt ausgehender Strahlen gebildet und beschreibt somit die Verteilung des Lichtstromes in die einzelnen Richtungen des Raumes.⁶²

$$\Omega = A/r^2$$

Abbildung 11: Formel zur Berechnung des Raumwinkels.⁶³

⁵⁸ <http://de.wikipedia.org/wiki/Lichtstrom> [Stand: 08.01.2014]

⁵⁹ Vgl. Ackermann 2006, S. 102

⁶⁰ <http://de.wikipedia.org/wiki/Beleuchtungsst%C3%A4rke> [Stand: 08.01.2014]

⁶¹ [http://de.wikipedia.org/wiki/Lichtst%C3%A4rke_\(Photometrie\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Lichtst%C3%A4rke_(Photometrie)) [Stand: 08.01.2014]

⁶² Vgl. Zieseniß et al. 2009, S. 20

▪ Messgeräte der Lichttechnik

Die o.g. lichttechnischen Größen können mit unterschiedlichsten Messgeräten ermittelt werden. Üblicherweise werden in einem Fernsehstudio folgende Messgeräte verwendet (siehe Tab. 8).

Lichttech. Messgerät	Verwendung
Luxmeter	Ermittlung der Beleuchtungsstärke von Lichtquellen
Leuchtdichtemesser	Ermittlung der Lichtdichte L in cd/m^2 von Lichtquellen
Farbtemperaturmessgerät	Ermittlung der Farbtemperatur einer Lichtquelle (für LED nur beschränkt geeignet)
Allgemeine Messgeräte	Verwendung
Laserabstandsmessgerät	Zur Abstandsermittlung (Höhe des Raumes)
Diagnose-Prüfgerät	Durchführung der Durchgangs-, Schutzleiter-, Isolationswiederstands-, Kurzschluss- und Funktionsprüfung
Volt-, Ampere- und Ohmmeter	Ermittlung der drei Grundwerte des Ohm'schen Gesetzes

Tabelle 8: Messgeräte der Lichttechnik.⁶⁴

2.2 Grundlagen und Grundbegriffe der Beleuchtung in Fernsehstudios

In der Beleuchtung, speziell im Theater oder im Fernsehstudio, ist die Lichtrichtung aus welcher der Darsteller beleuchtet wird, sehr entscheidend. Das Erscheinungsbild des Darstellers kann dadurch völlig verändert dargestellt werden. Als Lichtrichtung wird Seitenlicht, Oberlicht, Gegenlicht, Vorderlicht, Unterlicht und Schatten als künstlerisches bzw. gestalterisches Mittel in der Beleuchtung bezeichnet.⁶⁵ Speziell in Fernsehstudios kommen noch das Führungslicht sowie Aufhelllicht, Hinterlicht, Dekorationslicht, Kante, Spitze, Kicker, Gloriole und das Kleidungslicht hinzu. Licht verändert somit die Wirkung von Personen und Objekten und erweist sich damit als formgebendes Medium.⁶⁶ Für die Realisierung diese o.g. gestalterischen Mittel des Lichtes in der Studio- bzw. Bühnenbeleuchtung sind die im folgenden Kapitel beschriebenen Leuchtmittel und Lichtquellen notwendig.

Die verschiedenen Möglichkeiten der Regelung und Steuerung der Studio- bzw. Bühnenbeleuchtung sollen nur soweit Gegenstand der vorliegenden Arbeit sein, wie sie unmittelbar in Scheinwerfern integriert sind. Zum Verständnis zeigt die folgende Abb. 12 den Beleuchtungstechnischen Kreislauf in einem Fernsehstudio.

⁶³ <http://de.wikipedia.org/wiki/Raumwinkel> [Stand: 08.01.2014]

⁶⁴ Vgl. Ackermann 2006, S. 191

⁶⁵ Vgl. Ackermann 2006, S. 78

⁶⁶ Vgl. Ackermann 2006, S. 96

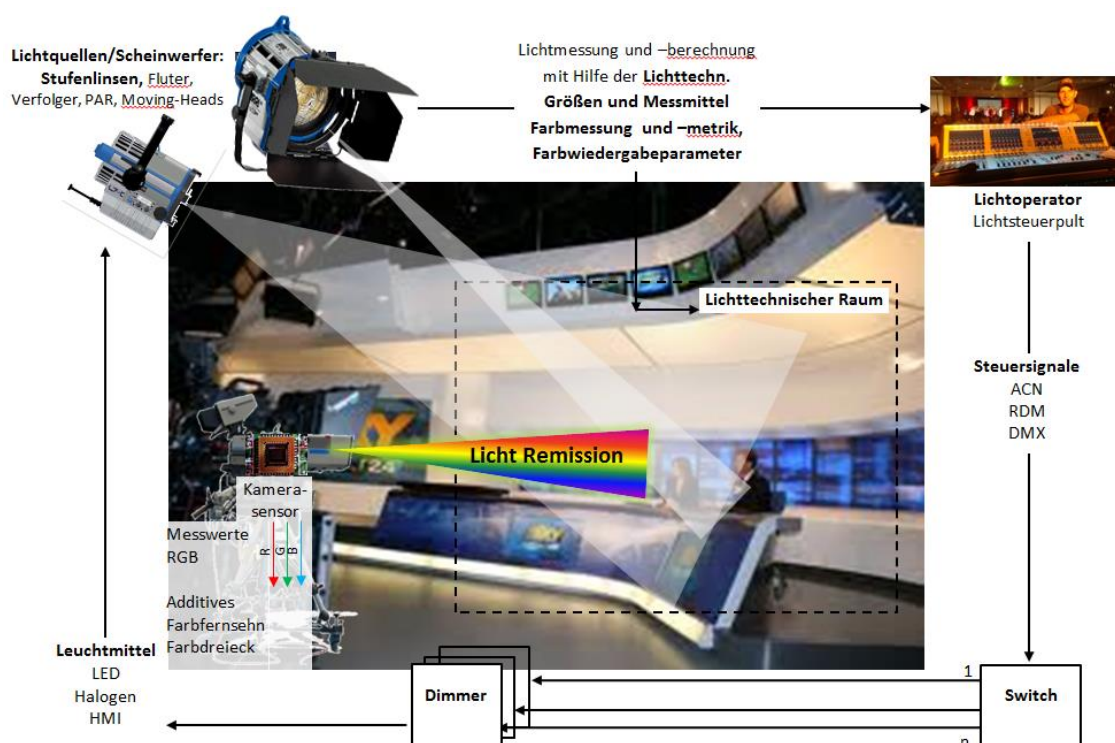


Abbildung 12: Beleuchtungstechnischen Kreislauf in einem Fernsehstudio.

2.2.1 Leuchtmittel in Fernsehstudios

Allgemein sind Leuchtmittel alle elektrischen Verbraucher die Licht erzeugen.⁶⁷ Diese unterscheiden sich in ihrer Leistungsaufnahme, dem Einsatzgebiet, der Versorgungsspannung, durch den Aufbau, die Größe und der Form des Leuchtmittels, der Farbtemperatur, Lebensdauer und ihrer Lichtausbeute. Im Folgenden werden Leuchtmittel für eine fernsehstudiorelevante Umgebung beschrieben und nur auf wenige, wichtige Parameter eingegangen. Nachstehend soll ein kurzer allgemeiner Überblick zu Leuchtmitteln gegeben werden. Anschließend werden die in einem Fernsehstudio eingesetzten Leuchtmittel näher beschrieben und es wird nur auf die wichtigsten einsatztypischen Parameter eingegangen.

Überblick der Leuchtmittel für Fernsehstudios

Üblicherweise strahlen Leuchtmittel, wie o.g., verschiedene elektromagnetische Wellen aus. Diese bestimmen das Spektrum einer Lichtquelle. Dabei kann man grundlegend zwischen zwei Hauptgruppen unterscheiden, dem Kontinuumstrahler und dem Linienstrahler (siehe Abb. 13).

⁶⁷ Vgl. <http://de.wikipedia.org/wiki/Leuchtmittel> [Stand: 08.01.2014]

Ein Kontinuumstrahler sendet das volle sichtbare Spektrum des Lichtes aus. Der Linienstrahler nur einen Teil des o.g. sichtbaren Spektrums des Lichtes und erzeugt dadurch einzelne Linien in der spektralen Remmissionskurve (siehe 2.1.1).

Weiterhin lassen sich die verwendeten Lampen bzw. Leuchtmittel in der Fernsehstudiobeleuchtung nach ihrer Lichterzeugung in drei weitere Gruppen (siehe Abb. 13) einteilen.

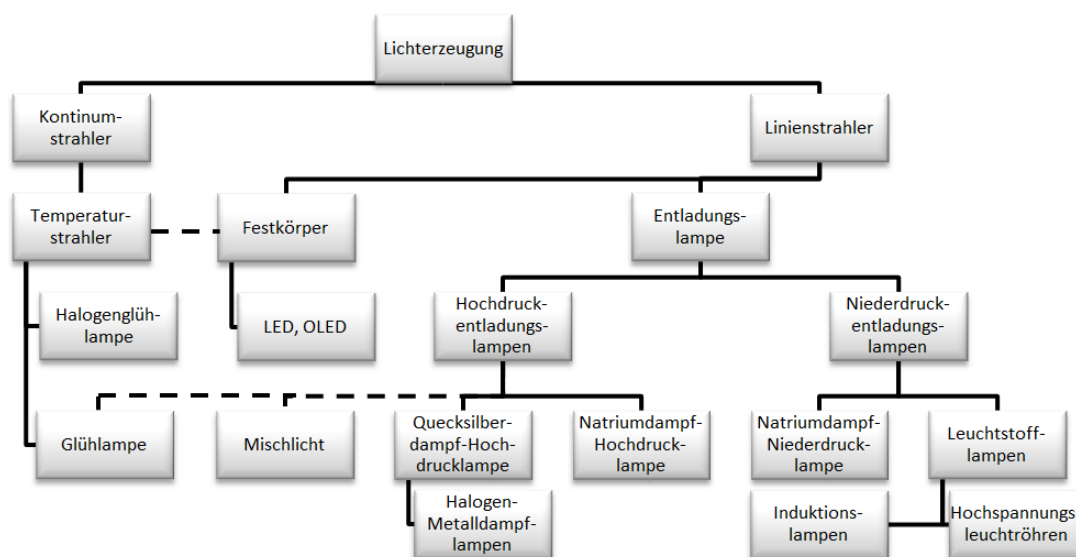


Abbildung 13: Übersicht über die Lampensysteme.

In diesem Kapitel werden hierbei nur die konventionellen Leuchtmittel (Temperaturstrahler und die Entladungslampen) ausführlich erläutert. Die dritte Hauptgruppe (Festkörper), wie LED als neuartige Lichttechnologie, wird im Kapitel 3 näher beschrieben.

▪ Temperaturstrahler

„Temperaturstrahler verhalten sich näherungsweise wie ein o.g. „Schwarze Strahler“ (Schwarzer Körper), der eine ideale thermische Strahlungsquelle darstellt. Er dient als Grundlage für theoretische Betrachtungen sowie als Referenz für praktische Untersuchungen elektromagnetischer Strahlung.“⁶⁸ Die übliche Farbtemperatur dieser Leuchtmittel für ein Fernsehstudio liegt bei 3200 K und wird als Kunstlicht bezeichnet.⁶⁹

„Die Lichtausbeute dieser Temperaturstrahler ist relativ gering, weil die Ausstrahlung vorwiegend im unsichtbaren IR-Bereich als Wärmestrahlung stattfindet und nur ein kleiner Anteil des Spektrums sichtbar ist.“⁷⁰

Temperaturstrahler sind zum Beispiel Glühlampen oder Halogenglühlampen.

⁶⁸ http://www.et-inf.fho-emden.de/~elmalab/beleucht/download/Blit_3.pdf [Stand: 08.01.2014]

⁶⁹ Vgl. <http://de.wikipedia.org/wiki/Kunstlicht> [Stand: 08.01.2014]

⁷⁰ Ris 2003, S. 55

Glühlampen werden als solches in Fernsehstudios nur noch sehr selten verwendet, somit dient die Erläuterung dieses Leuchtmittels hierbei nur zum Verständnis der Funktion von Temperaturstrahlern. „Bei Glühlampen wird ein sehr dünner Wolframdraht mit einem Durchmesser von einigen hundertstel Millimeter beim Stromdurchgang auf eine Temperatur von etwa 2700 K gebracht. Weiterhin bestehen diese Leuchtmittel aus einem Sockel und einem Glaskolben, der die Licht erzeugenden Glühwendel enthält“.⁷¹ Dieser Glaskolben ist bei kleinen Glühlampen meist luftleer gepumpt (Vakuumlampe), bei größeren Glühlampen ist er mit einem Gas befüllt und kann somit mit höheren Temperaturen bei gleicher Lebensdauer betrieben werden und strahlt ein weißeres Licht ab.⁷²

Des Weiteren sind Halogenglühlampen für die vorliegende Arbeit von sehr großer Bedeutung, da es im späteren Vergleichsversuch die Referenz- bzw. Bezugsquelle darstellt. Außerdem sind unter anderem diese Leuchtmittel der absolute Standard in Fernsehstudios.

Halogenglühlampen sind ähnlich wie Glühlampen Temperaturstrahler, mit allerdings einer höheren Betriebstemperatur und damit weißerem Licht mit einer Farbtemperatur von 2800 K bis 3200 K. Dies wird erreicht, indem das Füllgas bei Halogenglühlampen mit Jod oder eine Bromverbindung zugesetzt wird. Dieses Füllgas bewirkt, dass der Verdampfungsprozess des Wolframs verlangsamt wird und es kommt zu einem sog. Kreisprozess, der die Schwärzung des Glaskolbens stark dezimiert.⁷³

Durch dieses Füllgas ist die Betriebstemperatur einer Halogenglühlampe sehr hoch und muss dadurch sehr kompakt gebaut werden, wodurch sich allgemein die Gefahr des Platzens des Leuchtmittels erhöht. Diese kompakte Bauform erlaubt jedoch eine sehr gute Lichtführung innerhalb des Leuchtmittels und hat somit zahlreiche Vorteile gegenüber der klassischen Glühlampe (siehe Tab. 9).

→ Kleines Bauvolumen
→ Höher Lebensdauer
→ Höhere Farbtemperaturen
→ Brillantes Licht
→ Praktische keine Kolbenschwärzung
→ Höhere Wirtschaftlichkeit

Tabelle 9: Vorteile von Halogenglühlampen.⁷⁴

Weiterhin werden diese Halogenleuchtmittel in sog. Reflektorglühlampen unterschieden. Hierbei ist für ein Fernsehstudio die Preßglaslampe (PAR) zum Einsatz als Effektlucht von Bedeutung. Diese bewirkt eine Lichtlenkung des Lichtes des Leuchtmittels, durch ein auf der

⁷¹ Ris 2003, S. 63

⁷² Vgl. Ris 2003, S. 65

⁷³ Vgl. Ris 2003, S. 67

⁷⁴ Vgl. Ris 2003, S. 69

Innenseite des Kolbens angebrachte Spiegel.⁷⁵ Üblicherweise werden diese Leuchtmittel in PAR-Scheinwerfern (Siehe Abschnitt 2.2.2) verwendet. Hierbei werden unter anderem in Fernsehstudios Leuchtmittel wie die NSP (Narrow Spot) mit der Bezeichnung LIF: CP/61, ANSI: EXD, Sockel GX16D mit 1000W eingesetzt.⁷⁶

Bei Temperaturstrahlern gibt es verschiedenste Bauformen, die unter anderem von Sockelform und Glaskolben abhängig sind. Die wichtigste Bauform für Stufenlinsenscheinwerfer (siehe Abschnitt 2.2.2) in Fernsehstudios und für die Betrachtung in dieser Arbeit ist unter anderem die einseitig gesockelte Halogenlampen LIF: CP/89, ANSI: FRL, sockel G22 mit 650W und einer Farbtemperatur von 3200 K bzw. das Halogenleuchtmittel LIF: CP/71, ANSI: FKJ, Sockel G22 mit 1000W (siehe Anlage D).⁷⁷ Auf weitere Halogenleuchtmittel wird an dieser Stelle nicht eingegangen.

Die Lichtfarbe dieses Leuchtmittels hat die Eigenschaft, bei Reduzierung des Lichtstromes (dimmen) entlang des in Kapitel 2.1.1 genannten Planckschen Kurvenzugs, Richtung Rot „zuwandern“. Somit verändert dieses Halogenleuchtmittel im Allgemeinen seine Farbtemperatur um 2% bei einer Spannungsänderung an der Lampe um 5%.⁷⁸ Generell jedoch ist dieses Leuchtmittel ein Kontinuumstrahler, der homogene gleichförmige Strahlung aussendet, wobei die spektralen Remissionskurven kontinuierlich verlaufen (siehe Abb 2 in 2.1.1).

▪ Entladungslampen

Gasentladungslampen funktionieren im Prinzip ähnlich wie die o.g. Temperaturstrahler. Sie erzeugen das Licht nicht durch Temperaturstrahlung, sondern durch einen Entladungsvorgang in ionisierten Gasen, meist Metaldämpfe und/oder Edelgase, in einem Glasrohr. Bei Leuchtstofflampen und Quecksilberdampf-Hochdrucklampen setzt man zusätzlich Leuchtstoffe ein, die durch die Entladung angeregt werden und ihrerseits Licht abstrahlen.⁷⁹

Die wohl wichtigste Entladungslampe für den Film- und Fernsehsektor ist die Halogen-Metaldampflampe. Üblicherweise wird dieses Leuchtmittel als HMI bezeichnet, dies ist eine von OSRAM eingetragene und patentierte Bezeichnung.⁸⁰ Dieses Leuchtmittel verwendet ebenfalls den bereits erwähnten Halogenkreislauf. Es besitzt jedoch ca. viermal höhere Lichtleistung gegenüber der Halogenglühlampe und eine zwanzigmal größere Lichtdichte. Das ausgestrahlte Licht dieser HMI-Leuchtmittel erreicht eine Farbtemperatur von 5.600 K bis 6.000 K und wird als Tageslicht bezeichnet.

⁷⁵ Vgl. Bär 1996, S. 222

⁷⁶ Vgl. <http://www.dg-lichtshop.de/OS-4008321205896-ENG> [Stand: 10.01.2014]

⁷⁷ Vgl. <http://lichtprofi.system-shop.at/sitemap.htm> [Stand: 10.01.2014]

⁷⁸ Vgl. <http://www.hbernstaedt.de/knowhow/leuchtmittel/farbtemperatur.htm> [Stand: 10.01.2014]

⁷⁹ Vgl. Ris 2003, S. 71

⁸⁰ Vgl. Ackermann 2006, S. 85

Es gibt in dieser Rubrik der Entladungslampen noch weitere unterschiedliche Verfahren, Bauformen und Funktionsprinzipien, auf welche hier jedoch nicht weiter eingegangen werden soll.

- Festkörper

Hierzu zählen ebenfalls verschiedene der o.g. Temperaturstrahler und unter anderem auch Leuchtdioden (LED) und organische Leuchtdioden (OLED).

„Eine organische Leuchtdiode (eng. organic light emitting diode, OLED) ist ein leuchtendes Dünnschichtbauelement aus organischen halbleitenden Materialien“⁸¹ mit sehr guter Farbtreue und Farbintensität.⁸² Jedoch stellt bei dieser Lichttechnologie z.Zt. „das größte technische Problem, die vergleichsweise geringe Lebensdauer mancher aus organischen Materialien bestehenden Bauelemente, dar.“⁸³ Trotzdem bietet diese Technologie bereits heutzutage sehr viele neue Einsatzmöglichkeiten und wird durch Weiterentwicklung in Zukunft für die Beleuchtungsindustrie noch sehr interessant werden. Diese neuartige Lichttechnologie wurde in der vom Verfasser erstellten MINI-BA zum Thema „Auswirkungen der Entwicklung von Organischen Leuchtdioden (OLED) auf die digitale Außenwerbung“⁸⁴ vom 9. Januar 2013 genauer untersucht und wird somit in der vorliegenden Arbeit keiner weiteren Betrachtung unterzogen.

Vertiefend werden die Funktionsweise, Eigenschaften, Einsatzgebiete, Chancen sowie Risiken der LED-Lichttechnologie im Kapitel 3 ausführlich behandelt.

Ein allgemeiner Vergleich der wesentlichsten Leuchtmittel für ein Fernsehstudio ist in den Anlagen C zu finden.

Kennzeichnung von Leuchtmitteln

Allgemein werden Leuchtmittel in verschiedene Lampentypen eingeordnet. Die Bezeichnung dieser Lampentypen erfolgt in D, CH, A und NL den Vereinbarungen vom ZVEI (Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V.).⁸⁵

Weiterhin wurde im Rahmen der IEC ein internationales Bezeichnungssystem definiert und als DIN 49805 "Internationales Lampenbezeichnungssystem ILCOS" (IEC 1231/ International Lamp Coding System) herausgebracht (siehe Anlage D).⁸⁶

⁸¹ <http://de.wikipedia.org/wiki/OLED> [Stand: 10.01.2014]

⁸² Vgl. http://www.ledshift.com/News/artikel/QLEDs_Lichterzeugung_mit_Quantum_Dots.html [Stand: 10.01.2014]

⁸³ <http://de.wikipedia.org/wiki/OLED#Nachteile> [Stand: 10.01.2014]

⁸⁴ Vgl. Dietze 2013, S. 1

⁸⁵ http://www.et-inf.fho-empden.de/~elmalab/beleucht/download/Blit_3.pdf [Stand: 10.01.2014]

⁸⁶ http://www.et-inf.fho-empden.de/~elmalab/beleucht/download/Blit_3.pdf [Stand: 10.01.2014]

Allgemein soll ein herstellerübergreifender Austausch von Leuchtmitteln ermöglicht werden, dazu wurde von der Lighting Industry Federation der LIF-Code für Leuchtmittel eingeführt. Dabei sind folgende Kennbuchstaben (siehe Tab. 10) beim LIF-Code für bestimmte Typenklassen vorgesehen.

Kennbuchst.	Beschreibung
A1	Dia oder Overheadprojektoren
CP	Einseitig gesockelt unter anderem für Fresnelscheinwerfer, typisch CP41, CP71, CP90
P2	Farbfilmen 3200K bei offenen Leuchten
P1	Farbfilmen 3400K
T	Ähnlich wie CP aber für Theater mit 2900 - 3050K, typisch T19, T29

Tabelle 10: LIF-Code für Leuchtmittel.⁸⁷

Leider ist nicht für jedes Leuchtmittel ein LIF-Code vorhanden. Deshalb wurde eine weiterer gängiger Code, der ANSI Code (American National Standards Institute), entwickelt. Auch hier wird die Spezifikation mechanisch, elektrisch und photometrisch für einen herstellerübergreifenden Austausch garantiert. Beispielsweise hat ein typisches Leuchtmitteltyp in einem Fernsehstudio mit LIF Code CP71 einen ANSI Code von FKJ für ein 1000W, 230V Leuchtmittel.⁸⁸

2.2.2 Lichtquellen und Scheinwerfertypen in Fernsehstudios

Scheinwerfer in Fernsehstudios sind sog. selbstleuchtende Lichtquellen erster Ordnung, da sie selbst Licht erzeugen.⁸⁹ Passive, reflektierende Lichtquellen, wie z.B. der angestrahlte Mond oder Katzenaugen, sollen in der vorliegenden Arbeit nicht betrachtet werden.

Überblick der Scheinwerfertypen für Fernsehstudios

Im Folgenden werden die speziellen Lichtquellen für ein Fernsehstudio kurz erläutert.⁹⁰ Hierbei werden nur Lichtquellen erläutert, die für das Verständnis als wichtig betrachtet wurden. Weiter Ausführungen sind in der Anlage E zu finden. Lichtquellen z.B. für allgemeine Beleuchtung werden hier ebenfalls nicht weiter erläutert.

▪ Parabolspiegelscheinwerfer (PAR-Scheinwerfer)

Der PAR-Scheinwerfer ist eine sehr häufig als Effektlucht verwendete Lichtquelle in Fernsehstudios. Hierbei wurde gänzlich auf Linsensystem verzichtet, um einen hohen optischen Wirkungsgrad zu erreichen. Das Leuchtmittel sitzt hierbei direkt im Brennpunkt eines

⁸⁷ <http://www.hbernstaedt.de/knowhow/leuchtmittel/lif.htm> [Stand: 10.01.2014]

⁸⁸ Ebd.

⁸⁹ Vgl. <http://de.wikipedia.org/wiki/Lichtquelle> [Stand: 10.01.2014]

⁹⁰ Vgl. Bär 1996, S. 286

Parabolspiegels und das Licht verlässt die Lichtquelle relativ parallel (laut 2.2.1). „Häufig werden solche Scheinwerfer im Niedervoltbereich in Gruppen angeordnet, so dass ein Lichtvorhang entsteht.“⁹¹ Eine Weiterentwicklung dieser Lichtquelle ist der sog. „Parblazer“, hierbei ist der Spiegel direkt im Leuchtmittel integriert. Diese Lichtquelle wird nicht im Niedervoltbereich betrieben.

Es gibt hierbei verschiedene Ausführungen, die nach Leuchtmitteldurchmesser kategorisiert werden (siehe Tab. 11).

Bezeichnung	Beschreibung
PAR 64:	Leuchtmitteldurchmesser = 203 mm x 3,14 = 64 cm aufgerundet
PAR 56:	Leuchtmitteldurchmesser = 178 mm x 3,14 = 56 cm aufgerundet
PAR 46:	Leuchtmitteldurchmesser = 146 mm x 3,14 = 46 cm aufgerundet
PAR 36:	Leuchtmitteldurchmesser = 114 mm x 3,14 = 36 cm aufgerundet

Tabelle 11: Ausführungen von PAR-Scheinwerfern.⁹²

Dieser Scheinwerfertyp wird in Fernsehstudios bereits zunehmend mit LED-Lichttechnologie betrieben.

▪ Fresnel- bzw. Stufenlinsenscheinwerfer

Stufenlinsenscheinwerfer sind die am häufigsten vorkommenden Scheinwerfertypen in der Fernsehstudioteknik und gehören zu dem absoluten Standard. Ihr Einsatzgebiet reicht von der Aufhellung einzelner Bildelemente, der Erzeugung eines gewollten Schattens bis hin zum Setzen einer sog. Drei-Punkt Ausleuchtung.⁹³

Bei diesen Stufenlinsenscheinwerfern befindet sich das Leuchtmittel vor einem Kugelspiegel, der das zurückstrahlende Licht gewinnbringend nach vorn reflektiert und durch eine sog. Fresnel-Linse, deren konvexe Seite konzentrisch ausgefräst wurde, als Nutzlicht bündelt.⁹⁴

Diese Fresnel-Linse ist ringförmig in verschiedene Bereiche aufgeteilt und variiert je nach Bereich in ihrer Stärke (siehe Abb. 14). Somit wird das Licht beim passieren der Linsen-Oberfläche unterschiedlich gebrochen, dabei ist der Brechungswinkel nicht von der Dicke, sondern dem Winkel zwischen den beiden Oberflächen abhängig.⁹⁵

Dadurch werden das Gewicht und das Volumen solcher Linsen im Vergleich zu üblichen Linsen gleicher Brennweite erheblich verringert.⁹⁶

⁹¹ Vgl. Ackermann 2006, S. 80

⁹² <http://www.hbernstaedt.de/knowhow/scheinwerfer/par/par.htm> [Stand: 10.01.2014]

⁹³ Vgl. Ackermann 2006, S. 101

⁹⁴ Vgl. Ebd.

⁹⁵ Vgl. <http://de.wikipedia.org/wiki/Fresnel-Linse> [Stand: 10.01.2014]

⁹⁶ Vgl. Ebd.

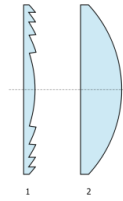


Abbildung 14: Querschnitt einer Fresnel-Linse und einer üblichen Linse mit gleicher Brennweite.⁹⁷

Im Inneren dieses Scheinwerfers sitzt die Komponenten (Leuchtmittel und Spiegel) auf einem beweglichen Schlitten, der mechanisch zur oder von der Linse weg bewegt werden kann (siehe Abb. 15).



Abbildung 15: Innerer Aufbau eines Stufenlinsenscheinwerfers vom Typ ARRI 650Plus⁹⁸

Bewegt man diese Komponenten zur Linse hin, wird der Abstrahlwinkel dieses Scheinwerfers immer größer (FST), anders herum wird dieser Winkel eben immer kleiner (SST).⁹⁹ Hierdurch ist es möglich den Abstrahlwinkel in einem sehr großen Bereich zu verändern (siehe Abb. 16).

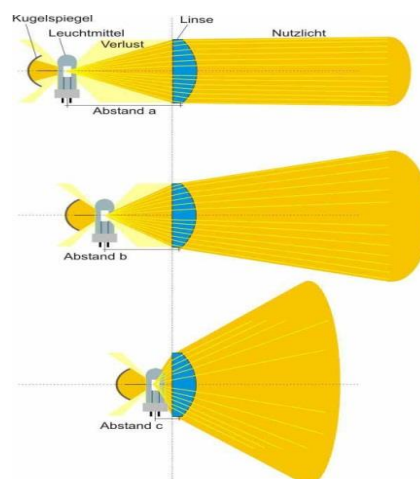


Abbildung 16: Variation des Abstrahlwinkels durch Abstandänderung zwischen Komponente und Stufenlinse.¹⁰⁰

⁹⁷ Vgl. <http://de.wikipedia.org/wiki/Fresnel-Linse> [Stand: 10.01.2014]

⁹⁸ Vgl. <http://www.hbernstaedt.de/knowhow/scheinwerfer/linsen/linsen.htm> [Stand: 10.01.2014]

⁹⁹ Vgl. Ackermann 2006, S. 101

¹⁰⁰ <http://www.hbernstaedt.de/knowhow/scheinwerfer/linsen/linsen.htm> [Stand: 10.01.2014]

Eine andere Form des Linsenscheinwerfers ist der Plankonvex-Linsenscheinwerfer. Die Funktionsweise und Einsatzgebiete entsprechen dem o.g. Stufenlinsenscheinwerfer, obwohl dieser spezielle Scheinwerfertyp vornehmlich in Theatern eingesetzt wird. Durch das andere Linsensystem, entsteht ein sog. Koronaeffekt, wobei ein bläulicher Rand um den Lichtkegel entsteht. Dies wird bei Stufenlinsenscheinwerfer durch die andere Linse gänzlich beseitigt.¹⁰¹

Diese Stufenlinsenscheinwerfer werden in Fernsehstudios üblicherweise mit einem Halogenleuchtmittel als Kunstlichtscheinwerfer eingesetzt, sind jedoch auch als Tageslichtscheinwerfer verwendbar. Hierbei wird das in Kapitel 2.2.1 genannte Halogenleuchtmittel gegen ein Halogen-Metaldampfleuchtmittel getauscht.

Dieser Lichtquellentyp wird oftmals nach dem Verbrauch der elektrischen Leistung kategorisiert. Somit kommen Begriffe wie eine 1 KW Stufenlinse oder eine 2 KW Stufenlinse als Größeneinheit üblicherweise vor.

Wie im Kapitel 2.1.2 beschrieben, werden für Fernsehstudios teilweise konstante Beleuchtungsstärken über große Flächen benötigt. Daher werden sehr lichtstarke und somit große Stufenlinsenscheinwerfer bis zu 5 KW eingesetzt, um über eine weite Entfernung eine möglichst große Fläche mit ausreichend Beleuchtungsstärke gleichmäßig auszuleuchten. Jedoch raten Beleuchtungsmeister diesen Effekt durch viele kleine (1 KW und 2 KW) Scheinwerfer zu erzielen.¹⁰²

- LED-Stufenlinsenscheinwerfer

Alle aufgeführten Lichtquellen der Beleuchtung in Fernsehstudios sind gegenwärtig bereits mit neuartiger LED-Lichttechnologie verfügbar, wobei hierbei die Funktionsweise und der Aufbau meist variieren.

Jeder Hersteller dieser neuartigen Lichtquellen verbaut seine Leuchtmittel anders, daher soll der Aufbau des LED-Stufenlinsenscheinwerfers vom Typ L7C der Firma ARRI exemplarisch für die Funktionsweise dargestellt werden.

Dieser LED-Stufenlinsenscheinwerfer besitzt im Inneren statt eines Halogenbrenners eine LED-Lightengine (siehe 3.1.1) und 3 optische Elemente. Diese Komponente setzt sich aus der in Abb. 17 dargestellten Reihenfolge, der o.g. LED-Lightengine, einem Kollimator, einem Kondensor und einer Fresnel-Linse zusammen.

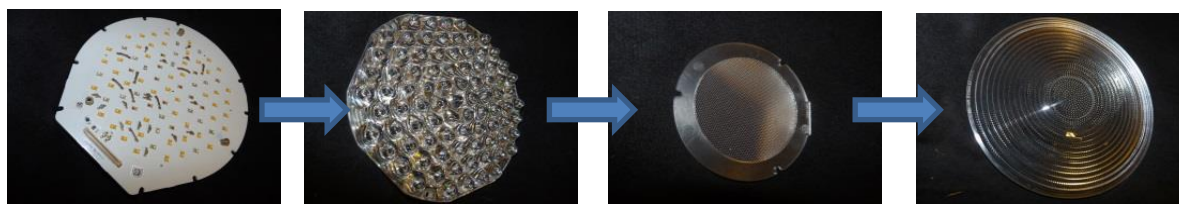


Abbildung 17: Aufbau eines neuartigen LED-Stufenlinsenscheinwerfers vom Typ ARRI L7C.

¹⁰¹ Vgl. Ackermann 2006, S. 81

¹⁰² Uwe Gebauer (2014): schriftliche Mitteilung vom 12.02.2014

Durch den Kollimator wird das abgestrahlte Licht der LED-Lightengine im o.g. Kondensor gebündelt und diese Komponenten sind der Ersatz für das in konventionellen Stufenlinsenscheinwerfern eingesetzte Halogenleuchtmittel. Die Mechanik der Fokussierung funktioniert im Inneren ähnlich wie bei einem konventionellen Stufenlinsenscheinwerfer. Hierbei wird jedoch die Komponente nicht auf einem Schlitten bewegt, sondern die Stufenlinse von dem o.g. Kondensor hin oder weg.

Dazu kommt, dass dieser Typ von LED-Stufenlinsenscheinwerfer über einen stufenlosen Dimmer im Scheinwerfer, variable Farbtemperatureinstellungen, stufenloser Grün-Magenta-Korrektur und einem DMX-Modul verfügt.¹⁰³ Diese Funktionen erleichtern bzw. vereinfachen die Arbeitsschritte bzw. Abläufe im beleuchtungstechnischen Kreislauf in einem Fernsehstudio (Abb. 12). Somit kann viel flexibler und kreativer auf verschiedene Studiosituationen reagiert werden.

LED-Stufenlinsenscheinwerfer sind die neusten Generationen von Stufenlinsenscheinwerfern in der Fernsehstudiobeleuchtung.

Kennzeichnung von Lichtquellen und Scheinwerfern

Für Lichtquellen gibt es in Deutschland verschiedene Sicherheitsprüfungen die von einer Prüfstelle des VDE (Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.)¹⁰⁴ oder des TÜV durchgeführt werden. Hierbei wird unter anderem die IP-Schutzart (DIN EN 60529 - Gegen Eindringen von Fremdkörper und Feuchte) und die Schutzklasse (DIN VDE 0711 - Schutz gegen elektrischen Schlag) ermittelt (siehe Tab. 12).¹⁰⁵

IP-Schutzart nach DIN EN 60529		Schutzklasse nach DIN VDE 0711
Erste Ziffer (Fremdkörperschutz)	Zweite Ziffer (Wasserschutz)	
0: Kein Schutz	0: Kein Schutz	1: Schutzleiter
...
6: Staubsicht	8: Unterwasser	3: Schutzkleinspannung < 50V

Tabelle 12: Die wichtigsten Schutzkennzeichnungen für Lichtquellen.¹⁰⁶

Weiterhin werden Lichtquellen mit dem bekannten CE-Zeichen vom Hersteller selbst, als eine Konformitätserklärung über die Erfüllung bestimmter EU-Richtlinien, gekennzeichnet.¹⁰⁷

Weitere Normen und Regelungen sind in der DIN 15560 - Scheinwerfer für Film, Fernsehen, Bühne und Photographie zusammengefasst.¹⁰⁸

¹⁰³ Vgl. http://www.arri.com/lighting/lighting_equipment/lampheads/led_lampheads/l_series/l7_c/ [Stand: 10.01.2014]

¹⁰⁴ <http://www.vde.com/de/Verband/Kontakt/Impressum-Technik/Seiten/Impressum-Haftung.aspx> [Stand: 10.01.2014]

¹⁰⁵ Vgl. Zeisenitz 2009, S.81

¹⁰⁶ Vgl. Ackermann 2006, S. 214

¹⁰⁷ Vgl. Zeisenitz 2009, S.81

¹⁰⁸ Ackermann 2006, S. 213

- Anforderungen an die Beleuchtung in einem Fernsehstudio

Für ein Fernsehstudio gibt es a.m.S. keine geregelten Normen für Beleuchtungsstärke, Lichtfarbe, Farbwiedergabe und Leuchtdichte, wie z.B. in den Normen DIN EN 124464, DIN EN 13201 und DIN EN 12193 für Arbeitsstätten, Straßenbeleuchtung und Sportstättenbeleuchtung.¹⁰⁹ Allgemein werden in Fernsehstudios die in Kapitel 2.1.2 genannten Parameter und in Kapitel 2.2.1 und 2.2.2 genannten Leuchtmittel und Lichtquellen abhängig von den Entscheidungsträgern eines Fernsehstudios und der jeweils gewünschten Lichtsituation ausgewählt.

Es gibt jedoch in der Planung eines Fernsehstudios verschiedenste Vorschriften, Regelungen und Hinweise, z.B. für Klimatisierung der Beleuchtung, der Befestigung an Traversen oder der raumtechnische Aufteilung. Dies wird unter anderem in der Versammlungsstättenverordnung der Länder bzw. die länderübergreifende Musterversammlungsstättenverordnung „MVStätt“ gesetzlich geregelt.

Weitere Normen für Sicherungen, elektrische Verbindungen bzw. Verteilungen, Steckdosen und Projektionen für Fernsehstudios sind unter anderem in der DIN 15563, 15564, 15565, 19046, 56903 bis 6, 49440, 49441, 56926 bis 7, 56930, 56932, und 60598 geregelt.

Die o.g. Leuchtmittel und Lichtquellen sind unabdingbare Voraussetzungen in der Fernsehstudiobeleuchtung. Im Folgenden Kapitel 3 soll nur die neuartige LED-Lichttechnologie für Leuchtmittel von, im Studiobereich eingesetzten, Scheinwerfern behandelt werden. Weiterhin soll untersucht werden, welche Veränderungen sich durch den Einsatz der neuartigen LED-Leuchtmittel bei Stufenlinsenscheinwerfern ergeben.

¹⁰⁹ Vgl. Zeiseniß 2009, S.94

3 Grundlagen und Entwicklung der LED-Lichttechnologie

*"In zehn Jahren [2017] wird kaum noch ein herkömmliches Leuchtmittel auf dem Markt sein. Nimbus-Geschäftsführer Dietrich Brennenstuhl"*¹¹⁰

Wie bereits in Kapitel 2.2.1 beschrieben, gehört die LED zu den Festkörper-Leuchtmitteln. Der Grundstein der Entwicklung dieses Leuchtmittels wurde 1907 von Henry Joseph Round gelegt und seither stetig weiterentwickelt. Diese neuartige Lichttechnologie steht in Bezug auf Einsatz- und Verwendungsmöglichkeiten in Fernsehstudios seither stark in der Diskussion.

*„Die Designer und Szenenbildner sind schwer begeistert und entwerfen die unmöglichsten Dekorationen ...“*¹¹¹

Im Folgenden soll diese energiesparende Technologie genauer anschaut werden. Es werden unter anderem der Aufbau, die Funktionsweise und die Bauform sowie Eigenschaften und Farben von LEDs dargestellt. Ebenso wird auf die Geschichte, die Entwicklung und Einsatzgebiete dieser Technologie eingegangen.

3.1 Grundlagen der LED-Lichttechnologie

LED wird grundlegend als Abkürzung für Lichtemittierende Diode (eng. lightemitting diode) bzw. auch Lumineszenz-Diode verwendet. Diese LED-Lichttechnologie ist gegenüber konventionellen Leuchtmitteln eine revolutionäre Technologie und wird in Zukunft die Welt des Lichtes verändern.¹¹² Im Folgenden werden Grundlagen, wie die Funktionsweise, Typen, Farb- und wärmespezifische Parameter, soweit sie für das Verständnis für den Einsatz der LED als Leuchtmittel in Scheinwerfern notwendig sind, dargelegt.

3.1.1 Funktionsweise von LEDs

Eine LED ist ein Halbleiter der Licht emittieren kann. Halbleiter sind wie in Kapitel 2.2.1 genannt Festkörper und „abhängig von ihrem Zustand elektrische Leiter oder Nichtleiter“.¹¹³ Somit bestehen LEDs aus mehreren Schichten von halbleitendem Material und wandeln elektrischen Strom direkt in Licht um.¹¹⁴ Daher besitzen LEDs die gleichen Grundeigenschaf-

¹¹⁰ <http://www.baulinks.de/webplugin/2007/1801.php4> [Stand: 10.01.2014]

¹¹¹ Uwe Gebauer (2014): schriftliche Mitteilung vom 02.02.2014

¹¹² Ris 2003, S. 120

¹¹³ <http://de.wikipedia.org/wiki/Halbleiter> [Stand: 10.01.2014]

¹¹⁴ Ris 2003, S. 121

ten wie pn-Halbleiterdioden. Diese sind jedoch nichtleuchtende Dioden und bestehen überwiegend aus dem chemischen Element Silicium, seltener auch Germanium oder Selen.¹¹⁵ Bei der neuartigen LED-Lichttechnologie werden für die Herstellung überwiegend Galliumverbindungen (Al In GaP und In GaN) als III-V-Verbindungshalbleiter verwendet.¹¹⁶

„Bei einem III-V-Verbindungshalbleiter handelt es sich um eine Verbindung von Materialien der chemischen Hauptgruppe III (Erdmetalle/Borgruppe) und V (Stickstoff-Phosphor-Gruppe), deren Kombination die elektrische Leitfähigkeit von Halbleitern besitzt“¹¹⁷ und für die Halbleitertechnik, sowie die Erzeugung von Leuchtdioden von großer Bedeutung ist.

Weiterhin kommt das verwendete chemische Element Gallium nur sehr selten vor und die Gewinnung ist sehr energie- und arbeitsaufwändig. Daher wird dieser Prozess auf sog. Billiglohnländer, wie die Volksrepublik China, ausgelagert. Ein großer Vorteil ist jedoch, dass man dieses Element wiederaufbereiten kann und es z.Zt. als nicht toxisch eingestuft wird (Unter Vorbehalt).¹¹⁸ Ausnahmen sind hierbei LEDs mit Galliumarsenid als Halbleiter. Dieser Stoff ist giftig und umweltschädlich und außerdem ist das Recycling dieses Stoffes noch nicht rentabel.

Weiterhin vergiftet der Abbau bzw. die Gewinnung laut Quelle¹¹⁹ die Umwelt. LED-Chips enthalten Arsen, Indium und/oder Antimon, die auf die menschliche Gesundheit und die Umwelt toxisch wirken können. Auch können in den LEDs z.B. Kabel, Drähte, Lötmittel und Klebstoffe, sowie Kühlkörper zur Anwendung kommen und diese können zusätzliche seltene bzw. giftige Metalle, wie Kupfer, Gold, Nickel und Blei, aufweisen.¹²⁰ Zusammenfassend wurde jedoch festgestellt, dass die Schadstoffmenge in den Leuchtmitteln im Vergleich zur Schadstoffbelastung durch die Produktion eher gering ist.¹²¹

Um die LEDs zum Leuchten zu bringen, „Wird nun an [die Anode bzw. Kathode] dieser Halbleiterdiode mit o.g. Eigenschaften eine [Gleich]spannung in Durchlassrichtung angelegt, so wandern die Elektronen von der n-dotierten Seite zur p-dotierten Seite.“¹²² Diesen Vorgang nennt man p-n-Übergang (siehe Abb. 18).

¹¹⁵ <http://de.wikipedia.org/wiki/Leuchtdiode#Funktionsprinzip> [Stand: 10.01.2014]

¹¹⁶ Ris 2003, S. 121

¹¹⁷ Vgl. <http://de.wikipedia.org/wiki/III-V-Verbindungshalbleiter> [Stand: 10.01.2014]

¹¹⁸ Vgl. <http://de.wikipedia.org/wiki/Gallium> [Stand: 10.01.2014]

¹¹⁹ <http://www.gluehbirne.ist.org/artikel/die-led-ist-eine-karotte.php> [Stand: 10.01.2014]

¹²⁰ <http://www.gluehbirne.ist.org/studien/studie-umweltauswirkungen-leds.php> [Stand: 10.01.2014]

¹²¹ Vgl. http://de.wikipedia.org/wiki/Leuchtdiode#Entsorgung_und_Recycling [Stand: 10.01.2014]

¹²² <http://de.wikipedia.org/wiki/Leuchtdiode#Funktionsprinzip> [Stand: 10.01.2014]

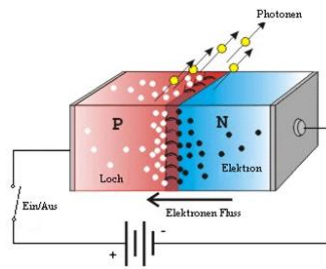


Abbildung 18: Chemischer Prozess innerhalb einer Leuchtdiode.¹²³

„Nach diesem o.g. Übergang geht das Elektron in ein energetisch günstigeres Valenzband über. Dieser Übergang wird Rekombination genannt, denn er kann auch als Zusammentreffen von einem Elektron im Leitungsband mit einem Defektelektron (Loch) interpretiert werden. Die bei der Rekombination frei werdende Energie kann in einem Halbleiter als Licht (Photon) abgegeben werden.“¹²⁴

Weiterführend werden LEDs in verschiedenen Baugruppen bzw. Bauformen unterschieden:

- T-Typ LED

Der T-Typ LED in der Größe von 5 mm ist die Älteste und meist verbreitetste Bauform ihrer Art.¹²⁵ Hierbei handelt es sich um eine bedrahtete Diode mit einem definierten engen Austrittswinkel. Dieser wird von dem meist durchsichtigen, linsenförmigen Kunststoffgehäuse aus Epoxidharz beeinflusst (siehe Abb. 19).¹²⁶

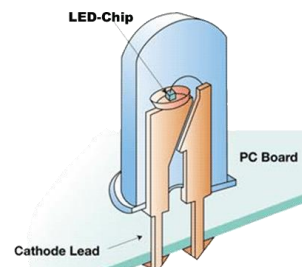


Abbildung 19: Aufbau einer T-Typ LED.¹²⁷

In diesem Guss sitzt der eigentliche LED-Chip auf einem Reflektor, der wiederum meist die Kathode darstellt.¹²⁸ Weiterhin werden die Anschlussdrähte dieser T-Typ LED als Wärmeableitung verwendet.

¹²³ http://winfwiki.wi-fom.de/images/3/32/LED_Funktion_pn-uebergang.gif [Stand: 10.01.2014]

¹²⁴ <http://de.wikipedia.org/wiki/Leuchtdiode#Funktionsprinzip> [Stand: 10.01.2014]

¹²⁵ Vgl. http://www.hbernstaedt.de/knowhow/led/led_typen.htm [Stand: 10.01.2014]

¹²⁶ Vgl. Ebd.

¹²⁷ <http://www.baulinks.de/licht/webplugin/2008/0586-leds.php4> [Stand: 10.01.2014]

¹²⁸ Vgl. <http://de.wikipedia.org/wiki/Leuchtdiode#Aufbau> [Stand: 10.01.2014]

Diese LED-Bauform wird sehr häufig für die Effekt- oder Dekorationsbeleuchtung in Fernsehstudios eingesetzt.

- SMD-LED

Der englischsprachige Begriff „Surface Mounted Device“ (SMD, deutsch: oberflächenmontiertes Bauelement) ist ein Fachbegriff aus der Elektronik. Diese Eigenschaft des Leuchtmittels vermeidet das Aufbohren von Platinen beim Aufbringen der LED. Somit können SMD-LEDs direkt auf der Platine verlötet werden und sparen sehr viel Platz (siehe Abb. 20).

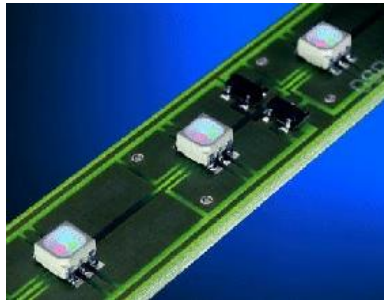


Abbildung 20: Aufbau einer SMD-LED.¹²⁹

Diese LED-Typen erreichen keine großen Leistungskategorien, da es hierbei ähnlich wie bei der T-Typ-LED Probleme mit der Wärmeableitung gibt. Dennoch findet diese Bauform in der Allgemein Beleuchtung z.B. für LED-Panele regen Anklang.¹³⁰

- Superflux-LED

Superflux-LEDs bzw. Spider-LEDs sind eine Weiterentwicklung der o.g. bedrahteten LEDs. Die vier Kontaktfüße (Pins) ermöglichen die Ansteuerung der 3 Grundfarben bzw. anders verdrahtet auch einer Farbe.¹³¹ Ein Nebeneffekt dieser Pins ist eine bessere Wärmeableitung (Abb. 21) und somit eine hohe Lebensdauer. Sie sind getrennt ansteuerbar und enthalten bis zu 4 Halbleiterkristalle (Chips).



Abbildung 21: Aufbau einer Superflux-LED.¹³²

¹²⁹ http://www.hbernstaedt.de/knowhow/led/led_typen.htm [Stand: 10.01.2014]

¹³⁰ <http://www.ledshift.com/Bauformen%20German.html> [Stand: 10.01.2014]

¹³¹ Uwe Gebauer (2014): schriftliche Mitteilung vom 12.02.2014

¹³² <http://www.led-shop24.de/superflux-leds/nichia-nspwr70css.htm> [Stand: 10.01.2014]

Der Abstrahlwinkel wird durch die verwendete Linse beeinflusst. Mehrere Superflux-LEDs zusammengefasst, besitzen einen großen Abstrahlwinkel und senden ihr Licht flächenförmig aus. Dies macht diese LED zu einem Multi-Chip-Träger mit vielen Anwendungsmöglichkeiten. „Superflux-LEDs werden in der Flächenbeleuchtung als LED-Birnen, LED-Tubes (ähnliche wie Leuchtstofflampen), LED-Modulen, aber auch immer öfter in der Automobilindustrie, eingesetzt. In der Werbebranche verwendet man sie z.B. für Schriftzugbeleuchtungen oder Diamontagen.“¹³³

Weiterhin bietet LUMILEDS sog. HighFlux-LEDs (Produktname Luxeon) mit einem höheren Lichtstrom an.¹³⁴

▪ COB-LED

Diese COB-LEDs (eng. Chip on Board) sind Hochleistungsleuchtmittel und erreichen durch höhere Ströme größere Lichtstärken. Dadurch wird demzufolge mehr Wärme entwickelt, welche abgeleitet werden muss. Da die LED-Chips bei dieser Bauform direkt auf einem Leiterplattenträger aufgebracht sind (sog. "Bonding") ist es möglich die Temperatur optimal aus dem Halbleiterkristall nach außen zu leiten.¹³⁵ Weiterhin sind diese LEDs, anders als o.g. Typen, in einer Silikonmasse vergossen (siehe Abb. 22).¹³⁶

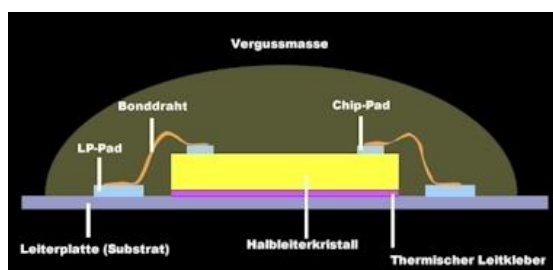


Abbildung 22: Aufbau einer COB-LED.¹³⁷

Dieser Typ von LED wird oft in sog. LED-ARRAYS (dt. LED-Felder) angeordnet, um eine Steigerung der Lichtintensität zu erreichen. Meist werden hierbei unterschiedliche Farbtemperaturen bzw. Lichtfarben miteinander kombiniert (siehe 3.1.2). Aktuell ermöglicht diese Bauform Chipdichten von bis zu 70 Chips/cm² (siehe Abb. 23).¹³⁸

¹³³ <http://www.ledshift.com/Bauformen%20German.html> [Stand: 10.01.2014]

¹³⁴ Vgl. <http://www.ledstyles.de/ftopic149.html> [Stand: 10.01.2014]

¹³⁵ http://www.hbernstaedt.de/knowhow/led/led_typen.htm [Stand: 10.01.2014]

¹³⁶ <http://de.wikipedia.org/wiki/Leuchtdiode#Aufbau> [Stand: 10.01.2014]

¹³⁷ http://www.hbernstaedt.de/knowhow/led/led_typen.htm [Stand: 10.01.2014]

¹³⁸ Vgl. <http://www.ledshift.com/Bauformen%20German.html> [Stand: 10.01.2014]

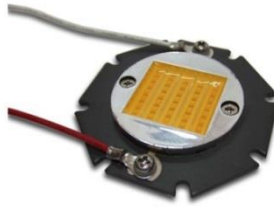


Abbildung 23: LED-ARRAY mit vielen COB-LEDs.¹³⁹

Eine erweiterte Zusammenfassung von COB-LEDs auf einem Leiterplattenträger als LED-ARRAY in einem LED-Stufenlinsenscheinwerfer nennt man LED-Lightengine (siehe 2.2.2).

Hierbei werden üblicherweise LEDs von renommierten, globalen Herstellern (CREE, Nichia, Seoul, PHILIPS, OSRAM) eingesetzt. Diese besonderen LED-ARRAYs besitzen z.Z. eine Leistung von bis zu 100 W. Für eine flexible Farbmischung werden jedoch kleinere LEDs (ca. 3 W) für den Einsatz in Fernsehstudios in einer LED-Lightengine zusammengefasst.

Die Entwicklung der Bauformen und Funktionen von LEDs geht stetig voran, somit wurden hier nur die a.m.S. wichtigsten LED-TYPEN dargestellt. Auf weitere Entwicklungen soll in der vorliegenden Arbeit nicht eingegangen werden.

Jede der hier vorgestellten LED-Typen benötigt für den Betrieb spezielle Wandler bzw. Vorschaltgeräte. Hierbei werden üblicherweise ein Gleichrichter und ein Vorschaltkondensator verwendet.¹⁴⁰ Weiterhin wird „zusätzlich ein Widerstand zur Strombegrenzung und ein weiteren Kondensator eingesetzt, die den Gleichrichter bzw. die LED vor dem vom Vorschaltkondensator verursachten Einschaltstromstoß sowie vor Überspannungsimpulsen im Netz schützt.“¹⁴¹

„Seit 2006 werden LED-Module als „Wechselstrom-LEDs“ vermarktet, die auf der ohnehin zur Wärmeableitung nötigen Metallkern-Leiterplatte auch einen Brückengleichrichter unterbringen. Dadurch ist jedoch eine Glättung des Gleichstroms und damit der Lichtstärke nicht mehr möglich.“¹⁴²

Neuste LED-Entwicklungen verwenden ein einfaches Kondensatornetzteil im Lampensockel, der als ein Spannungswandler für den Betrieb an 240 V fungiert.¹⁴³

¹³⁹ http://web.tradekorea.com/upload_file2/sell/28/S00027228/30W_HB_COB_LED__Al_Oxide_.jpg [Stand: 30.01.2014]

¹⁴⁰ Vgl. <http://de.wikipedia.org/wiki/Leuchtdiode> [Stand: 30.01.2014]

¹⁴¹ Ebd.

¹⁴² Ebd.

¹⁴³ Vgl. <http://www.cree.com/News-and-Events/Cree-News/Press-Releases/2013/February/276-LPW> [Stand: 30.01.2014]

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Wärmeableitung bei LEDs ein grundlegendes bauformabhängiges Problem darstellt. Dies beeinflusst die Parameter Farbe und Lichtstärke (siehe 3.1.2). Somit ist die Kühlung im Einsatzprozess ein sehr wichtiges Thema. Dies wird besonders bei hohen Lichtströmen sehr wichtig, wie z.B. bei größeren LED-ARRAYs. Dabei wird zwischen einer aktiven und einer passiven Kühlung unterschieden. Eine Kombination beider Prinzipien nennt man Hybrid. Bei einer passiven Kühlung wird mit sog. Heatpipes, Kühlblechen sowie Kühlrippen gearbeitet. Hierbei soll garantiert werden, dass die entstandene Wärme der LED-Lightengine bestmöglich abgeleitet wird. Dadurch werden die Bauform und das Gewicht zum Beispiel eines LED-Stufenlinsenscheinwerfers deutlich größer und begrenzen dieses Verfahren durch die maximal vertretbare Bauform. Diese passive Kühlung kann nur begrenzt (bis 100 W LED-ARRAYs) bzw. bis zu einer bestimmten Temperatur eingesetzt werden und muss somit mit einer aktiven Kühlung kombiniert werden. Durch diese aktive Kühlung mit Lüftern wird Platz gespart und die Kühlung optimiert. Jedoch erzeugen die eingesetzten Lüfter leise Geräusche, die in Anwendungsfällen laut ARRI¹⁴⁴ jedoch kaum stören und von den Anwendern akzeptiert werden (Unter Vorbehalt¹⁴⁵). Weiterhin werden Kühlungs-, Lüfter- und LED-Systeme stetig optimiert. Dadurch werden sie effizienter und verändern infolgedessen das Erscheinungsbild (Bauform) bzw. die Effizienz eines Scheinwerfers.¹⁴⁶

Somit sind die resultierenden Lichtströme sowie Lichtstärken von LED-ARRAYs bzw. LED-Stufenlinsenscheinwerfern, im Speziellen durch die Faktoren Wärme und Kühlung, stark begrenzt.

3.1.2 Eigenschaften und Farben von LEDs

Einzelne LEDs können verschiedene Farben emittieren und senden nur sehr wenig IR und UV Strahlung aus. Dabei ist die spektrale Remissionskurve sehr schmalbandig, fast linienartig. Aus diesem Grund wird diese Lichtquelle als Linienstrahler bezeichnet, der monochrome Strahlung aussendet. Für die Erzeugung einer Farbe werden verschiedenen Galliumverbindungen benötigt (siehe Anlage F). Somit „hängt die Farbe einer Leuchtdiode wesentlich vom Bandabstand des eingesetzten Halbleitermaterials ab und entspricht direkt einer bestimmten Wellenlänge λ bzw. dem Kehrwert der Frequenz der emittierten elektromagnetischen Strahlung.“¹⁴⁷ Mit der Additive Farbmischung einzelner LEDs können weitere Farbe erzeugt werden.

Weiterhin können LEDs durch die Summe einzelner Farben weißes Licht emittieren. Dabei unterscheidet man drei verschiedene Verfahren der Additiven Farbmischung.

¹⁴⁴ Dennis Jackstien (2014): schriftliche Mitteilung vom 14.01.2014

¹⁴⁵ Uwe Gebauer (2014): schriftliche Mitteilung vom 02.02.2014

¹⁴⁶ Dennis Jackstien (2014): schriftliche Mitteilung vom 14.01.2014

¹⁴⁷ <http://de.wikipedia.org/wiki/Leuchtdiode#Aufbau> [Stand: 30.01.2014]

▪ MULTI-LED

Bei Multi-LEDs wird die Farbe Weiß aus den drei Grundfarben Rot, Grün und Blau gemischt. Dafür wird eine UV-LED mit mehreren verschiedenen Leuchtstoffen (Rot, Grün und Blau) kombiniert. Dadurch wird ähnlich der folgenden Lumineszenzkonversions-Leuchtdiode der Farbstoff für die benötigte Farbe durch die UV-LED zum Leuchten angeregt (siehe Abb. 24). Dieses Prinzip wird aus praktischen Gründen in einem Bauteil durchgesetzt und wird in der Praxis eher selten angewandt.¹⁴⁸

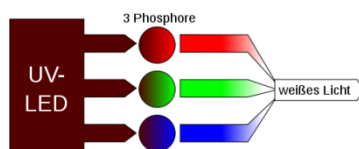


Abbildung 24: Weißlicht durch eine UV-LED mit verschiedenen Farbstoffen.¹⁴⁹

Weiterhin hat die Trennung der Strahlungsquelle vom Farbstoff zur Folge, dass die entstehende Wärme im LED-Chip nur einen geringen Einfluss auf die Farbstoffe und somit auf die emittierenden Farben hat. Durch dieses Prinzip ist die Lichtausbeute insgesamt eher schwach.¹⁵⁰

Desweiteren gibt es das verwendete Verfahren der Additiven Farbmischung durch drei verschiedene LED-Chips mit einer unterschiedlichen Lichtfarbe (Rot, Grün, Blau) (siehe Abb. 25).

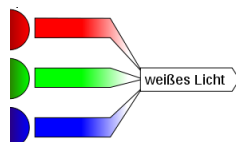


Abbildung 25: Funktionsweise einer MULTI-LED mit drei LED-Chips.¹⁵¹

Dieses Verfahren erzeugt sog. Mehrfachschaten, die regenbogenfarbig um den Lichtkegel herum entstehen. Deshalb wird diese Form häufig nur als Effektlucht in der Veranstaltungstechnik oder als Dekoration in Fernsehstudios verwendet.

Generell haben beide Prinzipien den Nachteil, dass durch die verschiedenen resultierenden Helligkeiten der einzelnen Chips und deren Degradation, Temperaturschwankungen entstehen, die wiederum die Farbe des einzelnen Chip beeinflussen (siehe unten). Jedoch ermög-

¹⁴⁸ Vgl. http://de.wikipedia.org/wiki/Leuchtdiode#Wei.C3.9Fe_LED [Stand: 30.01.2014]

¹⁴⁹ http://commons.wikimedia.org/wiki/File:LED_weiss_P_UV.svg [Stand: 30.01.2014]

¹⁵⁰ Vgl. http://de.wikipedia.org/wiki/Leuchtdiode#Wei.C3.9Fe_LED [Stand: 30.01.2014]

¹⁵¹ http://commons.wikimedia.org/wiki/File:LED_weiss_P_UV.svg [Stand: 30.01.2014]

licht die Ansteuerung jeder einzelnen Farbe, dass mischen verschiedener anderer Farben abseits der Weißerzeugung.

Ebenfalls ist der Farbwiedergabeindex (siehe Kapitel 2.1.1) beider Verfahren sehr gering. Es entstehen starke Lücken im Spektrum dieser MULTI-LEDs (siehe Abb. 26).

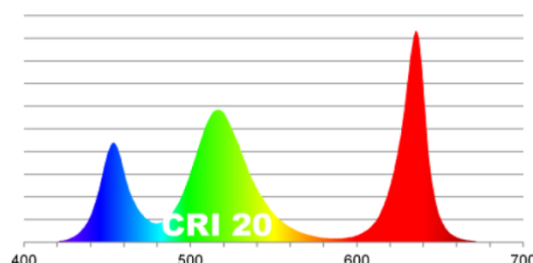


Abbildung 26: Spektrum einer MULTI-LED (3200 K).¹⁵²

Durch die additive Farbmischung dieser drei Farben entsteht, durch unterschiedliche spektrale Zusammensetzung (also gleicher Farbvalenz), eine bedingt gleiche Farbe. Jedoch wird bei einer Farbmessung deutlich, dass die Farben sehr unterschiedlich dargestellt werden. Aus diesem Grund sind diese Systeme für die Beleuchtung im Sendebetrieb in einem Fernsehstudio nicht geeignet. Dennoch wird dieses Verfahren z.B. bei der Hintergrundbeleuchtung von Farb-LCDs eingesetzt.

▪ LUMINESZENZKONVERSIONS-LED

Bei der Erzeugung werden blau emittierende LEDs (siehe Tab. 28, Anlage F), ähnlich wie bei Leuchtstofflampen mit Lumineszenzfarbstoffen, kombiniert. Dadurch wird das energiereiche, kurzwellige blaue Licht teilweise vom Farbstoff absorbiert. Nach anschließender Rekombination wird ein langwelligeres, energieärmeres gelbes Licht emittiert.¹⁵³ Da nicht der gesamte Blauanteil absorbiert wird, ergibt die resultierende additive Farbmischung der Spektralfarben weißes Licht (siehe Abb. 27).

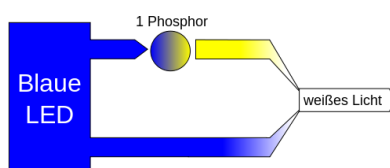


Abbildung 27: Funktionsweise einer LUMINESZENZKONVERSIONS-LED.¹⁵⁴

Durch dieses Verfahren können eine bessere Farbwiedergabe und unterschiedliche Farbtemperaturen erzeugt werden. Die Lücken im Spektrum sind größtenteils ausgeglichen und zeigen einen höheren Farbwiedergabeindex (siehe Abb. 28).

¹⁵² Jackstien 2013, S. 17

¹⁵³ <http://www.led-info.de/grundlagen/leuchtdioden/weisslicht-led/lumineszenz-konversion.html> [Stand: 30.01.2014]

¹⁵⁴ http://commons.wikimedia.org/wiki/File:LED_weiss_P_blaue.svg [Stand: 30.01.2014]

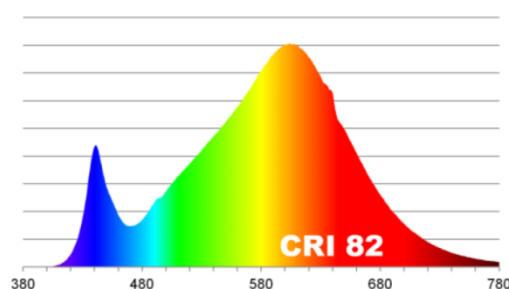


Abbildung 28: Spektrum einer LUMINESZENZKONVERSIONS-LED (3200 K).¹⁵⁵

Weiterhin können durch die Dosierung des Farbstoffes die spektralen Anteile der Farbmischung sowie die Farbtemperatur so variiert werden, dass weitere Farbtöne von Weiß oder zum Beispiel auch Magenta emittiert werden können. Die so entstandenen Farbtöne bewegen sich in der CIE-Normfarbtafel auf einer Mischgeraden zwischen zwei Farben.¹⁵⁶

▪ LED-ARRAYs

Viele Lampenhersteller verwenden bei der Produktion von LED-Scheinwerfern die bereits erwähnten LED-ARRAYs. Hierbei werden häufig nur die o.g. Lumineszenzkonversions-LEDs angeordnet, um die Effizienz dieses Leuchtmittels zu steigern. Diesen Vorgang des Mischens von warmweißen und kaltweißen LEDs nennt man BI-Color.¹⁵⁷

Der im Test verwendete Scheinwerfer L7C vom Hersteller ARRI verwendet ein anderes Prinzip. Durch die Kombination der beiden o.g. Prozesse (Multi- und Lumineszenzkonversions-LED) wird hierbei die Farbwiedergabe und Effizienz nochmals gesteigert. Da die spektrale Zusammensetzung einer weißen LED mit der von drei weiteren LEDs (Rot, Grün, Blau) gemischt wird, gleichen sich nochmals Lücken im Farbspektrum an (siehe Abb. 29).¹⁵⁸

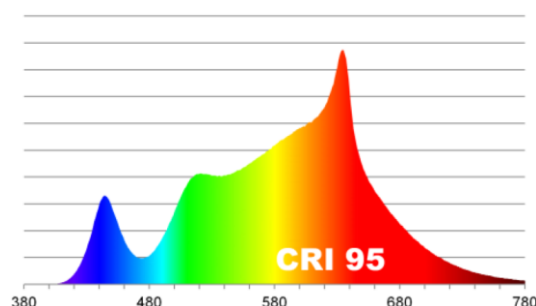


Abbildung 29: Spektrum eines LED-ARRAYs (RGB+W mit 3200 K).¹⁵⁹

Somit zeigen sich auch Unterschiede in der Darstellung in der CIE-Normfarbtafel zwischen den beiden genannten Verfahren innerhalb eines LED-ARRAYs (siehe Abb. 30).

¹⁵⁵ Jackstien 2013, S. 17

¹⁵⁶ Vgl. <http://www.led-info.de/grundlagen/leuchtdioden/weisslicht-led/lumineszenz-konversion.html> [Stand: 30.01.2014]

¹⁵⁷ Vgl. Jackstien 2013, S. 16

¹⁵⁸ Vgl. Ebd.

¹⁵⁹ Jackstien 2013, S. 17

zient ist abhängig vom Material. Die Strahlungsleistung fällt rein rechnerisch bei den meisten LEDs (z.B. Rote und Gelbe LEDs) bei einer Temperaturerhöhung um 100°C auf weniger als die Hälfte ab.¹⁶⁹ Weiße, Grüne und Blauen LEDs reagieren dagegen nicht annähernd so stark auf einer Temperaturerhöhung (siehe Abb. 33).¹⁷⁰ Die in Kapitel 2.2.1 genannten Temperaturstrahler verhalten sich genau umgekehrt.

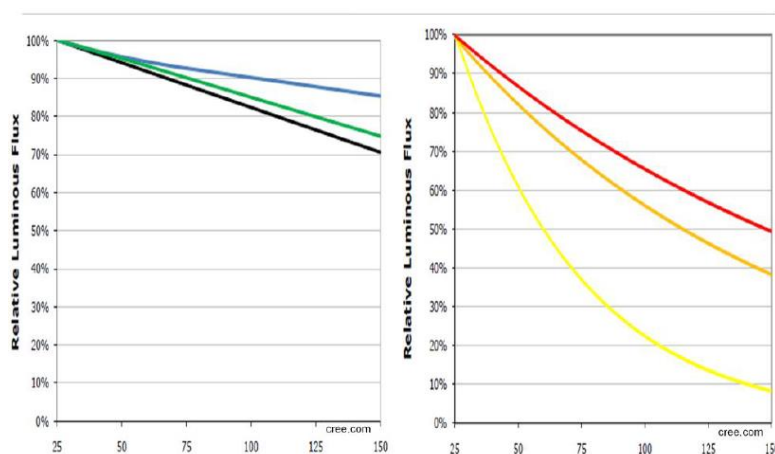


Abbildung 33: Temperaturverhalten verschiedener LED-Farben.¹⁷¹

„Eine Temperaturerhöhung bewirkt somit nicht nur eine Verschiebung der Kennlinie, sondern auch ein Wandern des Spektrums hin zu größeren Wellenlängen.“¹⁷² „Somit ist die Lichtfarbe je nach Halbleitertyp mehr oder wenig von der Umgebungstemperatur abhängig.“¹⁷³ Sehr stark ist dies bei den Chipmaterialien mit hohem Rotanteil zusehen, wodurch diese bei hohen Umgebungstemperaturschwankungen häufiger dynamisch nachgeregelt werden müssen.

Daher muss auf die, wie in Kapitel 3.1.1 genannte, Kühlung besonders Rücksicht genommen werden und ein Wärmestau in einer LED vermieden werden. LEDs strahlen jedoch im Vergleich zu konventionellen Leuchtmitteln kaltes Licht aus, sozusagen eine niedriger Temperatur und somit wenig schädlicher UV-Strahlung.

Des Weiteren spielt die Alterung (Degradation) für die Emissionseigenschaften einer LED eine entscheidende Rolle.¹⁷⁴ Im Allgemeinen nimmt die Intensität der Emissionsstrahlung einer unter konstanten Bedingungen betriebenen Leuchtdiode kontinuierlich ab. Dieses Verhalten hängt vermutlich mit der Wanderung bzw. Ausweitung von Störstellen im Kristall zusammen.¹⁷⁵ Weiterhin wird das Kunststoffgehäuse von LEDs durch die kurzwellige Strahlung von Blau sehr stark getrübt, wodurch dieser Farbeanteil während der Degradation erheblich

¹⁶⁸ Vgl. <http://www.led-info.de/grundlagen/leuchtdioden/temperatur.html> [Stand: 30.01.2014]

¹⁶⁹ <http://www.led-info.de/grundlagen/leuchtdioden/temperatur.html> [Stand: 30.01.2014]

¹⁷⁰ Dennis Jackstien (2014): schriftliche Mitteilung vom 10.02.2014

¹⁷¹ Vgl. Jackstien 2013, S. 7

¹⁷² Weigand 2003, S. 21

¹⁷³ <http://www.led-info.de/grundlagen/leuchtdioden/temperatur.html> [Stand: 30.01.2014]

¹⁷⁴ <http://www.led-info.de/grundlagen/leuchtdioden/alterung.html> [Stand: 30.01.2014]

¹⁷⁵ Ebd.

abnimmt.¹⁷⁶ Daher wird immer häufiger das Gehäuse aus einer Silikonmasse gefertigt, um diese Trübung zu verlangsamen.

Generell besteht bei dieser Technologie erheblicher Entwicklungsbedarf im Bereich Emissionseigenschaften, speziell bei der Lichtausbeute und der Lichtstärke. Diese Eigenschaften sind zum Beispiel für den Einsatz in Fernsehstudios enorm wichtig. Wie bereits im Kapitel 3.1.1 beschrieben, sind die o.g. Parameter unter anderem durch das Wärmemanagement einer LED begrenzt. Nichtsdestotrotz hat die Firma Cree bereits im Jahre 2013 eine weiße R&D Power LED mit 276 Lumen pro Watt an 350 mA und einer Farbtemperatur von 4401 K vorgestellt.¹⁷⁷ Diese Werte sind unter anderem von der Farbtemperatur bzw. der Lichtfarbe abhängig, zum Beispiel bei warmweißen LEDs sind solche Werte kaum erreichbar.¹⁷⁸ An dieser Stelle ist kritisch zu bemerken, dass diese Werte nur bei sehr niedrigen Temperaturen, kurz angeblitzt und mit extrem geringer Leistung erreicht werden können und somit reiner Laborwerte unter praxisfernen Bedingungen darstellen.¹⁷⁹

Werden LEDs in eine Lichtquelle eingebaut, „müssen zusätzliche Verluste durch das notwendige Vorschaltgerät (70 bis 95 % Wirkungsgrad) und evtl. durch die o.g. Optik berücksichtigt werden. Aktuelle Markenleuchtmittel erreichen (Stand Januar 2014) unter Berücksichtigung dieser Faktoren meist zwischen 50 und 110 lm/W. Sie sind damit etwa 3 bis 10 mal effizienter als herkömmliche Glühlampen (ca. 10-14 lm/W), etwa 2 bis 6mal effizienter als Halogenlampen (ca. 15 bis 20 lm/W) und ähnlich effizient wie Leuchtstoffröhren (ca. 70 bis 90 lm/W).“¹⁸⁰

Abschließend fasst Tab. 13 die wichtigsten Parameter einer Leuchtdiode zusammen.

Parameter	Wert
Durchlassspannung	2V bis 4V, je nach Lichtfarbe
Durchlassstrom	10 mA – 700 mA, je nach Lichtfarbe bzw. bei LED-ARRAYs bis 1.500 mA ¹⁸¹
Abstrahlwinkel	15° - 120°
Temperaturbereich	-40°C bis + 100°C

Tabelle 13: Wichtige Parameter einer Leuchtdiode.¹⁸²

¹⁷⁶ http://de.wikipedia.org/wiki/Leuchtdiode#Wei.C3.9Fe_LED [Stand: 30.01.2014]

¹⁷⁷ <http://www.cree.com/News-and-Events/Cree-News/Press-Releases/2013/February/276-LPW> [Stand: 30.01.2014]

¹⁷⁸ http://de.wikipedia.org/wiki/Leuchtdiode#Wei.C3.9Fe_LED [Stand: 30.01.2014]

¹⁷⁹ Dennis Jackstien (2014): schriftliche Mitteilung vom 10.02.2014 [Stand: 30.01.2014]

¹⁸⁰ http://de.wikipedia.org/wiki/Leuchtdiode#Wei.C3.9Fe_LED [Stand: 30.01.2014]

¹⁸¹ Dennis Jackstien (2014): schriftliche Mitteilung vom 10.02.2014 [Stand: 30.01.2014]

¹⁸² Ris 2003, S. 122

3.2 Entwicklung, Chancen, Risiken und Einsatzgebiete der LED-Lichttechnologie

Die LED-Technologie hat sich bereits bei vielen Anwendungen etabliert und wird in Zukunft in weitere Bereiche unseres Alltags vordringen. Die neueste Errungenschaft, durch Leistungssteigerungen und verschiedener Kühlverfahren, ist der LED-Stufenlinsenscheinwerfer. Dieser ist für Fernsehstudios in Zukunft von besonderer Bedeutung und wird a.m.S. eine starke Beachtung finden.

Im Folgenden werden die Entstehung, die Entwicklung von LEDs, sowie die Einsatzgebiete und dessen Chancen und Risiken diskutiert.

Geschichte der LED-Lichttechnologie

In Abb. 34 sind alle bedeutenden Entwicklungen der LED- und Halbleiter-Technologie chronologisch dargestellt. Ein kurzer entwicklungsgeschichtlicher Abriss ist in der Anlage G zusammengefasst.

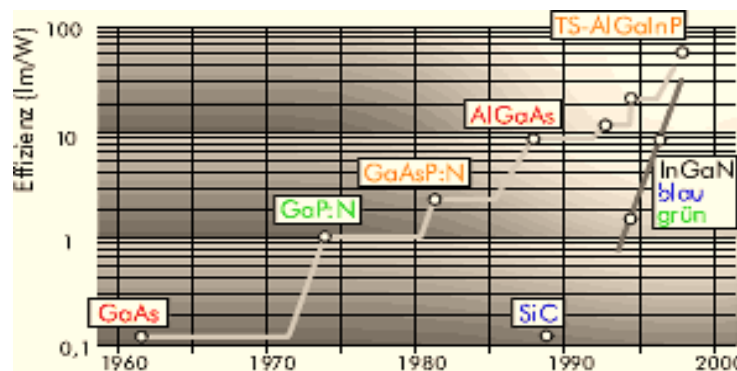


Abbildung 34: Entwicklung der Effizienz der LED-Technologien.¹⁸³

Wie in der Grafik zu erkennen ist, wurden und werden stetig effektivere Halbleitermaterialien für die LED-Produktion entwickelt und eine Effektivitätssteigerung um das zehnfache für jedes Jahrzehnt erreicht.

Weitere Ziele der Entwicklung dieser Technologie sind die Steigerung der Effizienz und die preiswertere Herstellung der Halbleiter. Aktuell besitzen hocheffektive Leuchtdioden bereits einen Wirkungsgrad von circa 90 % (effektiv circa 30%, wegen Reflexionen und Absorption). Daher werden stetig neue Einsatzgebiete erschlossen und in verschiedenen Bereichen können andere Leuchtmittel und Lichtquellen durch LED ersetzt werden.¹⁸⁴

¹⁸³ <http://www.led-info.de/grundlagen/leuchtdioden/geschichte.html> [Stand: 30.01.2014]

¹⁸⁴ Ebd.

Im Folgenden sollen nun die wesentlichen Parameter und Eigenschaften von LED zusammengefasst und die Folgen für die Leuchtmittel sowie Lichtquellen der Studiobeleuchtung abgeleitet werden. Zunächst werden die Chancen und Risiken der LED-Technologie diskutiert und dargelegt. Weiterhin werden im Anschluss die daraus resultierenden möglichen Einsatzgebiete von Leuchtdiode untersucht und hierbei der Einsatz bei der Studiobeleuchtung vertieft.

Chancen und Risiken der LED-Lichttechnologie

LEDs bieten durch Ihre Eigenschaften Chancen für neue Einsatzgebiete und bringen dadurch natürlich auch gewisse Risiken mit sich.

Im Folgenden werden die wesentlichsten Vorteile von LEDs in Tab. 14 erläutert

Vorteile	Grund
Keine schädliche UV- und IR- Strahlung, keine Störung des Orientierungssinnes von Insekten	Das relativ schmalbandige Spektrum einer Leuchtdiode
Unempfindlich gegen Erschütterungen, sehr lange Lebensdauer, wartungsarm, keine Einschaltverzögerung, größere Anzahl von Schaltzyklen, praktisch trägheitslos, schalt- oder modulierbar	Sehr robuste halbleitertypische Bauform mit chemischen Elementen, der keine Hohlkörper besitzt, die platzen können
Geringer Stromverbrauch (Reduzierung von CO ₂), bei Defekt bzw. direktem Kontakt nicht lebensgefährlich	Nur mit einer Schutzkleinspannung betrieben, da ein lichtemittierender Halbleiter
Sehr kleine miniaturisierte Lichtquellen, günstiger Transport	Bauformbedingt, ein sehr geringes Abmaß möglich
Sehr geringe Wärmeabgabe durch Licht	Kein Temperaturstrahler, hohe Effizienz, da wenig schädliche UV-IR-Strahlung
Umweltfreundlich, geringe Entsorgungskosten	Kein Quecksilber, wie z.B. bei Leuchtstofflampen, sondern nicht toxische Galliumverbindungen mit Ausnahme
Alle Lichtfarbe mit guter Farbwiedergabe möglich	Durch Additive Farbmischung gute Farbwiedergabe fast aller Lichtfarben möglich, zum Beispiel RGB+W

Tabelle 14: Vorteile der LED-Technologie.

In Tab. 15 werden die bereits teilweise im Kapitel 3.1.2 genannten Problematiken bzw. Nachteile von LED zusammengefasst.

Nachteile	Grund
Höherer Preis	Durch seltene Galliumverbindungen und aufwendige Produktionsverfahren
Geringe Gesamtlichtstrom	Anordnung mehrerer LEDs in LED-ARRAYs nötig, dann trotzdem durch Kühlung begrenzt
Lebensdauer	Schlechtes Wärmemanagement führt zu hohen Temperaturen und dadurch zur Verkürzung der Lebensdauer und der Lichtausbeute. Weiterhin gibt es keine Langzeitstudien.
Schwankungen in Lichtfarbe	Durch Schwankungen und Ungenauigkeit in der Produktion bzw. durch die Temperaturen während des Betriebs
sehr gerichteter Abstrahlwinkel	Selbst ohne Reflektor nur Abstrahlwinkel bis 140° ¹⁸⁵
Entzündung der Netzhaut und Augenschäden bei sehr langem Hineinsehen	Durch das kurzwellige Blau- oder Weißlicht von Hochleistungs-LEDs, je größer der Blauanteil, desto höher das Risiko, keine Hinweispflicht
Wenn Defekt, dann kompletter Verlust	Weil Reparaturen sehr aufwendig bis unmöglich sind, einzelne LEDs nicht ersetzbar
Empfindlichkeit gegenüber Mikrowellenstrahlung	Sie wird hervorgerufen durch die hohe Ladungsträgermobilität in den verwendeten III-V-Halbleitermaterialien ¹⁸⁶
Hoher Verbrauch an Edelmetallen (Gold, Kupfer, seltene Erden usw.) für die notwendige Elektronik	Für jedes neue LED-Leuchtmittel erneut benötigt, Stichwort: mehrfach Anordnung in LED-ARRAYs
Keine einheitlichen Normen und wenige Hinweispflichten	Es besteht keine Prüfpflicht von LED-Produkten, Hersteller müssen anhand einer Risikobeurteilung selbst entscheiden
Meist nur eine begrenzte Einsatztemperatur	Da geringe Sperrschichttemperatur im Halbleiter
Elektrosmogbelastung durch PWM (Pulsweitenmodulation)	Laut ÖKO-TEST überschreiten LEDs die TCO-Norm die für Computermonitore erlaubt ist, um mehr als das Zehnfache ¹⁸⁷

Tabelle 15: Nachteile der LED-Technologie.

Zusammenfassend kann man sagen, dass, wie im Kapitel 3.1.1 bereits erwähnt, durch Optimierung der Kühlverfahren eine höhere Lichtausbeute und ebenfalls eine längere Lebensdauer zu erwarten sind. Dies hat a.m.S. zur Folge, dass weniger Rohstoffe verbraucht werden müssen, da weniger Ersatz für Totalausfälle durch Überhitzung erforderlich ist. Zusätzlich sollte man weiterhin a.m.S. den Billig-Markt-Sektor einschränken und geregelte Prüfnormen und Vorschriften einführen. Dieses Vorgehen könnte eine Preissteigerung zufol-

¹⁸⁵ http://www.lichtmacherei.de/nachteile_der_led.htm [Stand: 30.01.2014]

¹⁸⁶ <http://www.baua.de/de/Produktsicherheit/Produktgruppen/Elektrische-Produkte/LED-Röhrenlampen.html> [Stand: 30.01.2014]

¹⁸⁷ <http://www.gluehbirne.ist.org/tests.php#oekotest1111> [Stand: 30.01.2014]

ge haben, die aber a.m.S. für diese hochentwickelte Technologie durchaus angemessen und vertretbar ist.

Einsatzgebiete der LED-Lichttechnologie

Diese obengenannten Vorteile eröffnen völlig neue und vielseitige Einsatzgebiete dieser Technologie. In Tab. 16 sind beispielhaft verschiedene Anwendungen und Einsatzgebiete aufgelistet.

Einsatzgebiet	Anwendungsbeispiel
Allgemeinbeleuchtung	Standardlampen etc. für Innenraum oder Außenraumbelichtung, sowie für Straßen-, Park- und Parkplatzbeleuchtung, Museums- und Vitrinenbeleuchtung, Möbelleuchten, Textil- und Objektbeleuchtung, Theater-, Film-, Studio- und Bühnenbeleuchtung etc.
Persönliche Beleuchtung	Taschenlampen, Stirnlampen, Fahrradbeleuchtung, Schlüsselanhänger, Gartenlampen, Arbeitsleuchten etc.
Projektoren	Als energiesparende Lichtquelle innerhalb des Projektors (nicht bildgebend)
Großdisplays und Beschilderung	Anzeige und Werbetafeln im Innen und Außenbereich, Orientierungsleuchten, Not- und Hinweisleuchten, Signalleuchten etc.
Automobil	Rück- und Vorderleuchten, Innenraumbelichtung sowie Statusanzeigen etc.
Mobiltelefone	Tastatur- und Hintergrundbeleuchtung, sowie Statusanzeigen
Andere Displays	Meist überwiegend Hintergrund bzw. Anzeigeleuchten
Fernseher und Monitore	Hintergrundbeleuchtung oder bildgebende Funktion durch RGB etc.
Computer und Laptops	Anzeigeelemente sowie Hintergrundbeleuchtung etc.
Film- und Fernsehstudiobeleuchtung, Theater- und Veranstaltungsbeleuchtung	Einsatz in vielfältigen Scheinwerfertypen und Effektbeleuchtungen

Tabelle 16: Einsatzgebiete und Anwendungsbeispiele der LED-Lichttechnologie.

Diese Zusammenfassung enthält nur die wesentlichsten Einsatzgebiete, auf die weiteren zahlreichen, allgemeinen Anwendungsbeispiele wird an dieser Stelle nicht weiter eingegangen. Jedoch wird in Zukunft durch weitere Entwicklungsarbeit die LED-Lichttechnologie in neue Einsatzgebiete vordringen und weiterhin konventionelle Leuchtmittel verdrängen. Diese Entwicklung wird in der Allgemeinbeleuchtung sehr deutlich, dies wird in Abb. 35 ersichtlich.

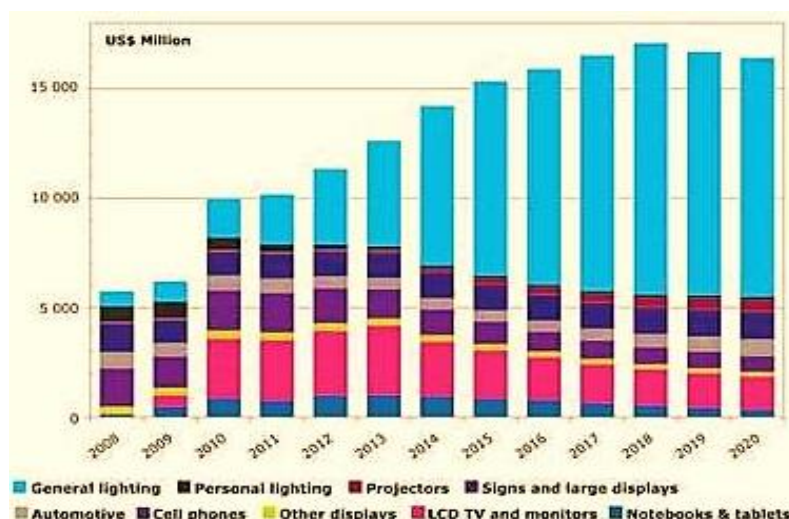


Abbildung 35: Marktentwicklung der Einsatzgebiete durch LED.¹⁸⁸

So erwartet man eine Umsatzsteigerung beim Einsatz von LED in der Allgemeinbeleuchtung von ca. 2 Mrd. USD im Jahr 2010 auf 12 Mrd. USD im Jahr 2018.

Theater-, Film-, Studio- und Bühnenbeleuchtung

In der vorliegenden Arbeit soll die Allgemeinbeleuchtung als bedeutungsvollstes Einsatzgebiet der LED-Lichttechnologie, hierbei die spezielle Anwendung in Theater-, Film-, Studio- und Bühnenbeleuchtung, wie folgt vertieft werden.

In der Anwendung für ein Fernsehstudio sind die meisten, in Kapitel 2.2.2 genannte Lichtquellen, bereits als energiesparende LED-Version verfügbar. Des Weiteren sind erheblich viele weitere Formen und Arten von Lichtquellen für dieses Einsatzgebiet verfügbar. Hierzu zählen diverse Lichtquellen für die Effektbeleuchtung, wie z.B. LED-Lichterketten, LED-Stripes und –Tubes. An dieser Stelle sind auch die kompakten Kamerakopflichter mit LEDs zu nennen. Diese bringen bei Außenaufnahmen neben den Energieersparnissen auch enorme Gewichtsvorteile mit sich.

Die neueste Errungenschaft in diesem Gebiet sind die in Kapitel 2.2.2 erwähnten LED-Stufenlinsenscheinwerfer. Hierbei gibt es vollständig neu entwickelte Modelle, sowie einfache LED-Austauschleuchtmittel für konventionelle Lichtquellen. Für die vorliegende Arbeit wurden nur die vollständig neu entwickelten LED-Stufenlinsenscheinwerfer als Lichtquellen betrachtet. Diese ermöglichen komplett neue Dimensionen der Lichtgestaltung und Beleuchtungstechnik für Fernsehstudios sowie bei Außenaufnahmen. Im Folgenden gibt Tab. 17 einen Marktüberblick über diesen neuartigen LED-Scheinwerfertyp mit den wesentlichsten Parametern der am Markt etablierten Hersteller und Produkte.

¹⁸⁸ <http://www.elektroniknet.de/typo3temp/pics/3db6b06f5a.jpg> [Stand: 30.01.2014]

Hersteller und Produkt	PARAMETER für Kunstlicht (3200 K)				
	Beleuchtungsstärke in lx	Stromverbrauch	Farbwiedergabe	Abstrahlwinkel	Kaufpreis
ARRI mit L7C Fresnel	FST 3m: 656 SST 3m: 4996	220 W	95 CRI	15° - 50°	2.421,00 € ¹⁸⁹
Zylight mit F8 LED Fr	FST 3m: 726 SST 3m: 5920	100 W	>97 CRI	16° - 70°	1.773,31 € ¹⁹⁰
Litepanels mit Inca 12	FST 3m: 1691 SST 3m: 11564	346 W	-	67° - 15°	4 018,28 € ¹⁹¹
Desisti mit Leonardo 120 watt	FST 3m: 680 SST 3m: 8935	160 W	90 CRI	9° - 62°	2.179,69 € ¹⁹²
Lupolux mit Dayled 1000	FST 3m: 800 SST 3m: 4300	90 W	>90 CRI	-	1.342,95 € ¹⁹³
DTS mit SCENA LED 150 FR	FST 3m: 518 SST 3m: 2243	160 W	>90 CRI	12,7° - 65°	1 007,23 € ¹⁹⁴
Mole mit 400W Studio JuniorLED	FST 3m: 4090 SST 3m: 9687	400 W	95 CRI	10° - 55°	2.193,75 € ¹⁹⁵
Showtec mit Performer 2000 LED	10000 lx auf 2m	100W	>83 CRI	13° - 41°	1.095,00 € ¹⁹⁶
Dedolight mit DLED12.0	Noch nicht Veröffentlicht	Noch nicht Veröffentlicht	Noch nicht Veröffentlicht	Noch nicht Veröffentlicht	Noch nicht Veröffentlicht

Tabelle 17: Marktüberblick über LED-Stufenlinsenscheinwerfer für einen möglichen Fernsehstudioeinsatz.

Es gibt hierbei noch weitere Anbieter dieses neuartigen LED-Stufenlinsenscheinwerfers. Oftmals findet man sehr preisgünstige Produktionsgüter aus Billiglohnländern, wobei die beworbenen Parameter a.m.S. nicht ganz der Praxis entspringen.¹⁹⁷

¹⁸⁹ <http://www.toneart-shop.de/arri-l7-c-stand-mount-blue-silver-3m-cable-schuko-connector-l1-31330cd.html?gclid=CL6OteahtrwCFSgewwodqDoAAg> [Stand: 30.01.2014]

¹⁹⁰ http://www.bhphotovideo.com/c/product/886683-REG/Zylight_26_01020_F8_LED_Fresnel_Daylight.html [Stand: 30.01.2014]

¹⁹¹ <http://store.litepanels.com/p/inca-12-tungsten-fresnel> [Stand: 30.01.2014]

¹⁹² http://www.bhphotovideo.com/c/product/877288-REG/DeSisti_Id320_110_LED_Leonardo_120W_Fresnel.html [Stand: 30.01.2014]

¹⁹³ http://www.profotshop.de/index.php?category_id=249&page=shop.product_details&product_id=2672&Itemid=70&option=com_virtuemart&vmccchk=1&Itemid=70 [Stand: 30.01.2014]

¹⁹⁴ http://b2b.plusmusic.ch/epages/Plusmusic.sf/de_CH/?ObjectPath=/Shops/Plusmusic/Products/16305264 [Stand: 30.01.2014]

¹⁹⁵ http://www.bhphotovideo.com/c/product/979458-REG/mole_richardson_8961_400w_juniorled_10_daylight.html [Stand: 30.01.2014]

¹⁹⁶ <http://www.bax-shop.de/showtec-performer-2000-led-fresnel-theaterspot-3200k?gclid=CLn50ZbqtbwCFQzItAodcjsA8w> [Stand: 30.01.2014]

¹⁹⁷ Bestätigt durch Uwe Gebauer (2014): schriftliche Mitteilung vom 12.02.2014

Zusammenfassend kann gegenwärtig festgestellt werden, dass die Produkte der Firmen Litepanels (Inca 12), Mole (400W Studio JuniorLED) und Zylight (F8 LED Fr) wegen der vom Hersteller angegebenen sehr hohen Beleuchtungsstärken a.m.S. in Zukunft zu beobachten sind. Jedoch können nur unabhängige Vergleiche die angegebenen Beleuchtungsstärken und somit die Zukunftsfähigkeit dieser Produkte bestätigen. Weiterhin gibt es z.Zt. leider auch noch keine Vergleichswerte der Farbwiedergabe zum Produkt der Firma Litepanels (Inca 12).

Der bereits in Kapitel 2.2.2 vorgestellte L7C von ARRI besitzt in seinen Parametern einen ausgewogenen Mittelwert im Vergleich zu den anderen Marktteilnehmern und stellt weiterhin in diesem Segment nach Aussagen des Herstellers gegenwärtig den Marktführer dar.¹⁹⁸ Aus diesen Gründen soll der LED-Stufenlinsenscheinwerfer ARRI L7C repräsentativ für die weiteren Untersuchungen im dem folgenden Kapitel verwendet werden.

Des Weiteren ist zu erwarten, dass der LED-Stufenlinsenscheinwerfertyp ebenfalls einer starken Produktentwicklung ausgesetzt sein wird und sobald die in Tab. 15 genannten Nachteile der LED-Technologie schrittweise überwunden werden, in höhere Leistungskategorien vordringt.

Bereits heutzutage finden diese neuartigen LED-Stufenlinsenscheinwerfer Anwendung in verschiedensten Einsatzgebieten in Fernsehstudios. Unter anderem werden Scheinwerfer dieses Typs im Südwestrundfunk Fernsehstudio in Stuttgart¹⁹⁹, im Fernsehstudio des Mitteldeutschen Rundfunk Thüringen²⁰⁰ (unter Vorbehalt) und wahrscheinlich im Neubau des Fernsehstudios der Hochschule Mittweida eingesetzt.²⁰¹

Es gibt jedoch auch noch sehr viele kritische Meinungen, Widerspruch bzw. Vorbehalte von Seiten der Beleuchtungsmeister und Lichttechniker renommierter Sendeanstalten und Fernsehstudios.

„LED ist zum jetzigen Zeitpunkt in der Beleuchtungstechnik (Personenlicht) nur eine Ergänzung, aber kein Ersatz. Zurzeit wird ein großer Rummel um diese Technik gemacht, obwohl diese in der Praxis noch weit entfernt von der konventionellen Technik ist. Ca. 50% der bei uns getesteten LED-Leuchten sind an der Praxis vorbei konstruiert (zu schwer, zu groß, zu laut, nur für innen, ungleichmäßige Ausleuchtung u.ä.). Als Bühnen- oder Studiobeleuchtung nicht im Einsatz, da noch kein passendes Gerät gefunden und die Investitionen in die Millionen gehen.“²⁰²

¹⁹⁸ Dennis Jackstien (2014): schriftliche Mitteilung vom 14.01.2014

¹⁹⁹ <http://www.stuttgarter-zeitung.de/inhalt.neue-swr-studios-der-moderator-greift-in-die-luft.67fe2cd8-ee15-4a5e-b557-523699086a4d.html> [Stand: 02.02.2014]

²⁰⁰ http://www.mdr.de/thueringen-journal/design118_showImage-3_zc-c4a1d70b.html [Stand: 02.02.2014]

²⁰¹ Markus Buchner (2014): schriftliche Mitteilung vom 17.02.2014

²⁰² Uwe Gebauer (2014): schriftliche Mitteilung vom 02.02.2014

Die gegenwärtig, teilweise noch vorhandenen kritischen Hinweise und Meinungen bestätigen auch andere Literaturquellen, speziell in Bezug auf die Farbwiedergabe dieser LED-Stufenlinsenscheinwerfer.

„Gegenüber Glühlampen und Hochdruck-Gasentladungslampen geringere Leuchtdichte, daher schlecht geeignet für stark bündelnde Scheinwerfer“²⁰³

„Farbwiedergabe weißer LED (blaue LED + ein Leuchtstoff) ist nicht in allen Anwendungsfällen ausreichend“²⁰⁴

„Diskontinuierliches Spektrum weißer LED (Nachteil gegenüber Halogen-Glühlampen)“²⁰⁵

„Die Problematik der Farbwiedergabe von LED-Leuchtmitteln ist hinsichtlich bekannt.“²⁰⁶

„... es ist nicht möglich, mit den in LEDs verwendeten Halbleitern ein der Glühbirne äquivalentes Licht zu erzeugen.“²⁰⁷

„Die Farbwiedergabe ist nicht in allen Anwendungen ausreichend.“²⁰⁸

„Das resultiert dann in einer unbefriedigenden Farbwiedergabe von R_a 60 - 80. Außerdem steigt die Gefahr einer Schädigung des Auges durch den hohen Blauanteil im Licht.“²⁰⁹

„Die Lichtqualität von Glühbirnen und Halogenlampen kann von LEDs auf Grund des schlechten Farbspektrums und dem daraus resultierenden niederen Farbwiedergabeindex R_a nicht erreicht werden.“²¹⁰

Diese vorangegangenen Meinungen über die Farbwiedergabe der neuartige LED-Lichttechnologie bestätigen auch Videoanalysen aus dem Jahre 2011 der Firma AMPAS.²¹¹

Auf Grund dieser z.Zt. noch vorhandenen kritischen Fachmeinungen in der Literatur sollen im Weiteren die Parameter und hier speziell die Farbwiedergabeeigenschaften von LED-Stufenlinsenscheinwerfer, als meist genutzter Lichtquellentyp in Fernsehstudios und der neueste Form der LED-Lichttechnologie, in Vergleichsversuchen gegenüber konventioneller Halogen-Stufenlinsenscheinwerfern genauer untersucht werden.

²⁰³ <http://www.led-lampe.info/vor-und-nachteile.html> [Stand: 02.02.2014]

²⁰⁴ <http://led-info.de/grundlagen/leuchtdioden/vor-und-nachteile.html> [Stand: 02.02.2014]

²⁰⁵ <http://www.led-lampe.info/vor-und-nachteile.html> [Stand: 02.02.2014]

²⁰⁶ http://www.hbernstaedt.de/knowhow/led/led_strahler_leuchten.htm [Stand: 02.02.2014]

²⁰⁷ <http://www.gluehbirne.ist.org/artikel/die-led-ist-eine-karotte.php> [Stand: 02.02.2014]

²⁰⁸ <http://www.lampenladen24.de/blog/led-die-zukunft-des-lichts/vor-und-nachteile-der-led-technik.html> [Stand: 02.02.2014]

²⁰⁹ <http://www.gluehbirne.ist.org/artikel/die-led-ist-eine-karotte.php> [Stand: 02.02.2014]

²¹⁰ Ebd.

²¹¹ http://www.oscars.org/video/watch/stc_ssl_pp_makeup.html [Stand: 02.02.2014]

4 Vergleich von konventioneller Lichttechnik mit neuartiger LED-Lichttechnologie - am Beispiel von Stufenlinsenscheinwerfern in der Fernsehstudiobeleuchtung

Für den Vergleich zwischen konventionellen Stufenlinsenscheinwerfern und neuartigen LED-Stufenlinsenscheinwerfern im Studiobereich ist es wichtig, repräsentative wissenschaftliche Vergleichsmethoden, besonders zur Beurteilung der Farbwiedergabeeigenschaften, anzuwenden.

Somit wurden umfangreiche lichttechnische Messungen zwischen verschiedenen LED- und Halogen-Stufenlinsenscheinwerfern in studiorelevanter Umgebung und deren Bewertung bzw. Gewichtung notwendig.

Damit soll erreicht werden, dass Studioscheinwerfer in ihren typischen Parametern miteinander verglichen werden können. Und es soll der Nachweis erbracht werden, dass die Substitution von herkömmlichen Studioscheinwerfern durch LED-Stufenlinsenscheinwerfer möglich ist.

4.1 Beschreibung der Vergleichsobjekte

Wie im Kapitel 2.2.2 bereits erwähnt, sind Fresnel- bzw. Stufenlinsenscheinwerfer, die am häufigsten vorkommenden Scheinwerfertypen in der Fernsehstudiobeleuchtung. Somit würde ein Ersatz dieser konventionellen Halogen-Stufenlinsenscheinwerfer, durch energieeffizientere LED-Stufenlinsenscheinwerfer gleichen Typs, viele Vorteile mit sich bringen.

Aus diesem Grunde ist der konventionelle Halogen-Stufenlinsenscheinwerfer als Referenzscheinwerfer und der LED-Stufenlinsenscheinwerfer als Vergleichsscheinwerfer für diesen Studiotest gewählt worden. Im anschließenden Kapitel sollen diese Versuchsobjekte näher beschrieben und deren technische Parameter erläutert werden.

4.1.1 Parameter der konventionellen Stufenlinsenscheinwerfer

Konventionelle Stufenlinsenscheinwerfer (siehe 2.2.2) in einem Fernsehstudio sind vorrangig mit einer Halogenglühlampe (siehe 2.2.1) versehen. In dem für diese Arbeit realisierten Studiotest wird sich auf dieses Leuchtmittel beschränkt. Tageslichtscheinwerfer werden an dieser Stelle nicht weiter betrachtet.

Im Vergleichsversuch wurde der konventionelle Stufenlinsenscheinwerfer vom Typ 650Plus der Firma ARRI (siehe Abb. 36) als Referenzlichtquelle gewählt. Dieser weist ungedimmt bei annäherndem Abstand ähnliche photometrische Daten, wie zu vergleichende LED-Stufenlinsenscheinwerfer auf.



Abbildung 36: Konventioneller Stufenlinsenscheinwerfer vom Typ ARRI 650Plus.²¹²

Üblicherweise werden jedoch in Film- und Fernsehstudios Stufenlinsenscheinwerfer mit höheren Beleuchtungsstärken (ab 1 kW) eingesetzt. Diese wiederum müssen dadurch sehr häufig gedimmt werden, da heutige Studiokameras sehr lichtempfindlich sind (siehe Kapitel 4.2.1). Somit ist dieser hier beschriebene Stufenlinsenscheinwerfer nur exemplarisch und stellvertretend für konventionelle mit Halogenglühlampen ausgestattete Stufenlinsenscheinwerfer.

Die wichtigsten technischen Daten des ARRI 650Plus sind in Tab. 18 dargestellt:

Parameter	Beschreibung
Lampenkopf:	Fresnel, 650 W
Lampentyp:	CP89 FRL 650 W / 230 V ; CP89 FRK 650 W / 120 V ; CP82 500W ; CP81 300W
Stromverbrauch:	650 W, 500 W, 300 W
Spannungsbereich:	230 V / 120 V
Dimmbarkeit:	Ja, 0 - 100 % per externem Dimmer
Kabel Optionen:	Schuko-Stecker
Farbtemperatur:	3200 K
Abstrahlungswinkel:	12 - 52°
Gewicht:	2,6 kg
Größe (HxBxT):	276 x 220 x 190 mm

Tabelle 18: Technische Daten des ARRI 650 Plus.²¹³

Die photometrischen Daten eines ARRI 650Plus mit einem „CP89 FRL 650 W / 230 V“ Brenner fasst Tab. 19 zusammen:

²¹²Vgl. http://www.arri.de/cn/lighting/lighting_equipment/lampheads/tungsten_lampheads/-arri_fresnel_tungsten/arri_650_plus/ [Stand: 15.12.2013]

²¹³ Vgl. Ebd.

Parameter	Abstand 3m in FST:	Abstand 3m in SST:
Lichttech. Größen:	1417lx, 14988cd, 9531lm	7694 lx, 69819cd, 2403lm
Abstrahlwinkel	52°	12°
Durchmesser	2.9 m	0.6 m

Tabelle 19: Photometrischen Daten des ARRI 650Plus.²¹⁴

Weiterhin liegt der Farbwiedergabeindex (CRI) in R_a dieses Scheinwerfers laut Laborwerten von ARRI bei 99,43.

Da der ARRI 650Plus die Referenzlichtquelle im Studiotest darstellte, im Folgendem die von ARRI gemessene Spektralkurve (Siehe Abb. 37).

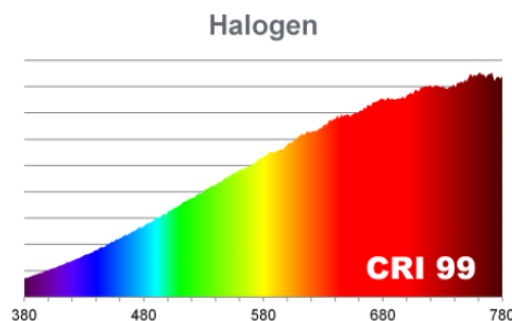


Abbildung 37: Spektralmessung mit Farbwiedergabeindex von ARRI.²¹⁵

Weiterhin wurden die Stufenlinsenscheinwerfer vom Typ ARRI True Blue T1 und Quartzcolor Polaris als konventionelle Stufenlinsenscheinwerfer im Studiotest eingesetzt. Die technischen und photometrischen Daten dieser beiden Scheinwerfer sind hierbei in der Anlage I aufgelistet.

4.1.2 Parameter der LED-Stufenlinsenscheinwerfer

Ein LED-Stufenlinsenscheinwerfer ist die neueste Generation von Stufenlinsenscheinwerfern, und wie bereits in Kapitel 2.2.2 beschrieben, mit einer LED-Lightengine+Komponente als Leuchtmittel ausgestattet. Bei ARRI wird diese Art von Scheinwerfer seit 2008 entwickelt und später auch produziert. Sie sind somit Marktführer und Vorreiter in der Entwicklung von LED-Stufenlinsenscheinwerfern.²¹⁶ Wie bereits im Kapitel 3.2 erwähnt, wurde der L7C der L-Serie von ARRI (siehe Abb. 38) als Vergleichstestscheinwerfer im Studiotest ausgewählt und eingesetzt.

²¹⁴ Vgl. <http://calc.arri.de/calculator> [Stand: 15.12.2013]

²¹⁵ Jackstien 2013, S. 17

²¹⁶ Dennis Jackstien (2014): schriftliche Mitteilung vom 14.01.2014



Abbildung 38: Ansicht eines ARRI L7C.²¹⁷

In der folgenden Tab. 20 sind die wichtigsten technischen Daten des ARRI L7C zusammengefasst:

Parameter	Beschreibung
Lampenkopf:	Fokussierbare Fresnel
Lampentyp:	LED
Stromverbrauch:	160 W Nominal, 220 W Maximum
Spannungsbereich:	100 - 250V AC, 50-60Hz
Dimmbarkeit:	0 -100% stufenlos
Kabel Optionen:	Schuko-Stecker, Edison-Anschluss
Abstrahlungswinkel:	15° - 50°
Größe (HxBxT):	Hybrid: 384x374x423 mm Active: 349x374x423 mm
Gewicht:	Hybrid: 10.9 kg Active: 8.2 kg
Farbtemperaturen:	2800 K - 10.000 K stufenlos einstellbar
Farbigkeit:	volle RGB+W Farbskala mit Farbton und Sättigung Steuer
Farbtemperatur Toleranz:	+/- 100 K (nominal), +/- 1/8 Grün-Magenta (nominal)
Grün-Magenta Korrektur:	stufenlos einstellbar (Full Minusgreen Full Plusgreen)
Ansteuerung:	Einfacher Schuko-Stecker, 5-Pin DMX Stecker In und Through, Optional Kontrollierbar am Bedien- und Anzeigefeld , Mini-USB
Umgebungstemperaturen:	Hybrid: -20 - 35° C Active: -20 - 45°
Lebensdauer:	50.000 Stunden

Tabelle 20: Technische Daten des ARRI L7C.²¹⁸

Tab. 21 stellt die photometrischen Daten eines ARRI L7C dar:

Parameter	Abstand 3m in FST:	Abstand 3m in SST:
Lichttech. Größen:	656lx, 6809cd, 3852lm	4996lx, 45472cd, 2130lm
Abstrahlwinkel	49°	14°
Durchmesser	2.7 m	0.7 m

Tabelle 21: Photometrischen Daten des ARRI L7C.²¹⁹

²¹⁷ Vgl. http://www.arri.de/cn/lighting/lighting_equipment/lampheads/led_lampheads/l_series/ [Stand: 15.12.2013]

²¹⁸ Vgl. http://www.arri.com/lighting/lighting_equipment/lampheads/led_lampheads/l_series/l7_c/ [Stand: 15.12.2013]

Weiterhin liegt der Farbwiedergabeindex dieses Scheinwerfers laut Laborwerten von ARRI bei 95,64.

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Firma ARRI über die ersten gemessenen Spektraldaten des ARRI L7C (siehe Abb. 39) dargestellt. Des Weiteren wurden die Testergebnisse der neuartigen Testmethodik TLCI (siehe 4.2.2) von Alan Roberts in Abb. 40 dargestellt.

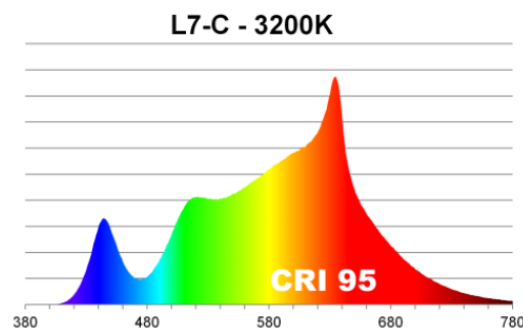


Abbildung 39: Spektralmessung mit Farbwiedergabeindex von ARRI.²²⁰

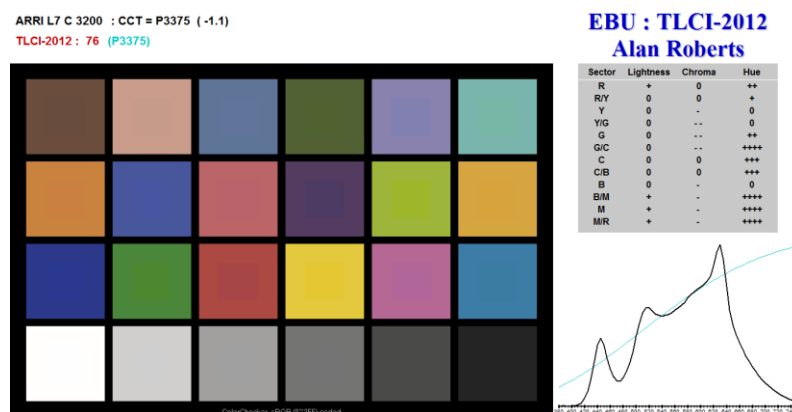


Abbildung 40: Spektralmessung mit TLCI-Messung von Alan Roberts.²²¹

Als weiterer Testscheinwerfer diene der ebenfalls, von der Firma ARRI zu Verfügung gestellte, LED-Stufenlinsenscheinwerfer vom Typ L7T. Hierzu wurden alle technischen und photometrischen Daten in der Anlage J aufgelistet.

Es gab noch die Absicht, weitere LED-Stufenlinsenscheinwerfer anderer Hersteller, im konkreten Fall die Sola 6 von Litepanels und die LED LEONARDO 120 W von Desisti, zu testen. Diese neuartigen LED-Stufenlinsenscheinwerfer waren zum Studiotest zwar verfügbar, aber leider nicht einsatzfähig, womit sich der Referenzvergleich mit diesen LED-Stufenscheinwerfern aus diesem Grunde nicht realisieren ließ und einem späteren Test vorbehalten bleibt.

²¹⁹ Vgl. <http://calc.arri.de/calculator> [Stand: 15.12.2013]

²²⁰ Jackstien 2013, S. 17

²²¹ <http://www.gtc.org.uk/tlci-results.aspx> [Stand: 18.12.2013]

4.2 Beschreibung der Vergleichsmethode für den Fernsehstudiotest

In diesem Kapitel werden der Versuchsaufbau und die verwendete Testmethode dargestellt. Diese ist a.m.S. neuartig, sehr innovativ, pragmatisch sowie für den Einsatz im laufenden Sendebetrieb eines Fernsehstudios geeignet und wurde für die vorliegende Arbeit entwickelt.

„Gute Methode, um schnell einen Vergleich durchzuführen. Viel besser, als z.B. mit dem Farbtemperaturmessgerät zu prüfen! Es geht hier dann im Praxisfall auch nicht um die 2. Stelle nach dem Komma, sondern eine gute, brauchbare Abschätzung. Dafür ist die Methode über WFM gut geeignet.“²²²

Weiterhin ist es für die Vergleichbarkeit der Farbabweichungen und –wiedergabe zwischen den Referenz- und Vergleichsscheinwerfern wichtig, die benutzten Farbmodelle zur späteren Berechnung kurz dargestellt. Dadurch soll die Verständlichkeit dieser komplexen Materie erhöht werden. Die Umrechnungsmöglichkeiten sowie ausführliche mathematischen Modelle stehen in der Anlage K zur Verfügung.

4.2.1 Versuchsaufbau und verwendete Messmittel

Um Stufenlinsenscheinwerfer optimal miteinander vergleichen zu können, bedarf es der richtigen Testsituation. Um einen repräsentativen Versuchsaufbau zu realisieren, wurde bei diesem Test der spätere Einsatzort, eine übliche Fernsehstudiumgebung, gewählt. Das verwendete Fernsehstudio in der HSMW hat das Abmaß 10.90m x 8.90m x 4.20m mit einer Anzahl von aktuell 24 konventionellen Halogen-Stufenlinsenscheinwerfern.

Es wurde in der Mitte des Fernsehstudios eine Kamera des Typs Grass Valley LDK8300 positioniert. Im Abstand von ca. zwei Metern stand ein Stuhl mit einer Farbtafel des Typs, X-Rite Colorchecker (Stand: Dezember 2012). Der Colorchecker (Color Rendition Chart oder oft auch Macbeth Colorchecker genannt) ist eine Farbkalibrierungstafel (siehe Abb. 41), bestehend aus 24 quadratischen Farbproben und wurde 1976 von McCamy, Marcus und Davidson eingeführt.²²³ Er ist absoluter Standard bei der Testung von Lichtquellen.

²²² Dennis Jackstien (2014): schriftliche Mitteilung vom 14.02.2014

²²³ McCamy et al. 1976, S. 95 ff.



Abbildung 41: Colorchecker mit 24 Farbproben.²²⁴

Anschließend wurde dieser Colorchecker von der Kamera fokussiert und mit dem zu testenden Scheinwerfer (siehe 4.1) beleuchtet. Die Scheinwerfer wurden oberhalb der Kamera, gewissermaßen als Kopflicht, mit einem Stativ fixiert und je nach Test an- oder ausgeschaltet (siehe Abb. 42).



Abbildung 42: Testaufbau mit Stufenlinsenscheinwerfern im Fernsehstudio der Hochschule Mittweida.

Die Studiokamera hat in der Signalkette des Versuchsaufbaus einen sehr wichtigen Teil und sendet im Format HDTV (NORM: IBU-R BT.709).

Studiokameras besitzen viele Möglichkeiten und Verfahren, ein Abbild einer Aufnahmeszene zu erzeugen. Dafür sind unter anderem die Kamerasensoren innerhalb einer Studiokamera von großer Bedeutung. Hierfür müssen zunächst die einzelnen Spektralbereiche einer Aufnahmeszene in die Primärfarben Rot, Grün und Blau getrennt werden. Diese Selektion kann optisch, örtlich oder zeitlich geschehen und wird üblicherweise auf sog. CCD-Sensoren oder

²²⁴ <http://en.wikipedia.org/wiki/ColorChecker> [Stand: 18.12.2013]

CMOS-Sensoren abgelegt (siehe Anlage H).²²⁵ Auf die Erläuterung von Aufbau und Funktionsweise, sowie die Verfahren der spektralen Trennung wird an dieser Stelle verzichtet, da das Messmittel bzw. der Kamerasensor der Studiokamera im Studiotest als Konstante angesehen wurde. Jedoch können sich „besonders bei der Korrektur von nicht optimal angepassten Sensorempfindlichkeiten durch Optimierung der Linearkombinationen (relative spektrale Empfindlichkeiten bei RGB²²⁶) des Kamerasensors verbesserte Möglichkeiten zur Berechnung der Farbvalenzen ergeben.“²²⁷ Durch moderne Kamerasensoren sind neuartige Studiokameras in der Lage, in sehr lichtschwachen Umgebungen noch ein gutes Kamerabild zu erzeugen.

Die im Studiotest verwendete Studiokamera besitzt drei Aufnahmechips (je einen für die Primärfarben: Rot, Grün und Blau) und ist somit das bildaufnehmende Messmittel im Versuchsaufbau. Über einen Prismenteiler wird das einfallende Licht in die RGB-Anteile aufgeteilt und jeweils einem Chip zugeführt. Jeder dieser CCD-Chips (Charged Coupled Device) nimmt eine der Farben auf.²²⁸ Die somit entstandenen Farbsignale des „3-CCD 2/3"-type 16:9 HD-DPM+ CCDs“²²⁹ der Studiokamera vom Typ LDK8300 werden über ein Glasfaserkabel digital im YCbCr-Farbmodell in die Bildregie des Fernsehstudios übertragen.

Dieses YCbCr-Farbmodell wurde für das Digitalfernsehen nach der Norm PAL entwickelt und teilt die Farbinformation in die Grundhelligkeit Y und die zwei Farbkomponenten Cb (Blue-Yellow Chrominance) und Cr (Red-Green Chrominance) auf.²³⁰ Dieser digitale Datenstrom wird für die Messgeräte der Bildtechnik (Waveformmonitor Tektronix WFM 8300) wieder in das analoge YPbPr Farbmodell gewandelt (siehe Abb. 43).

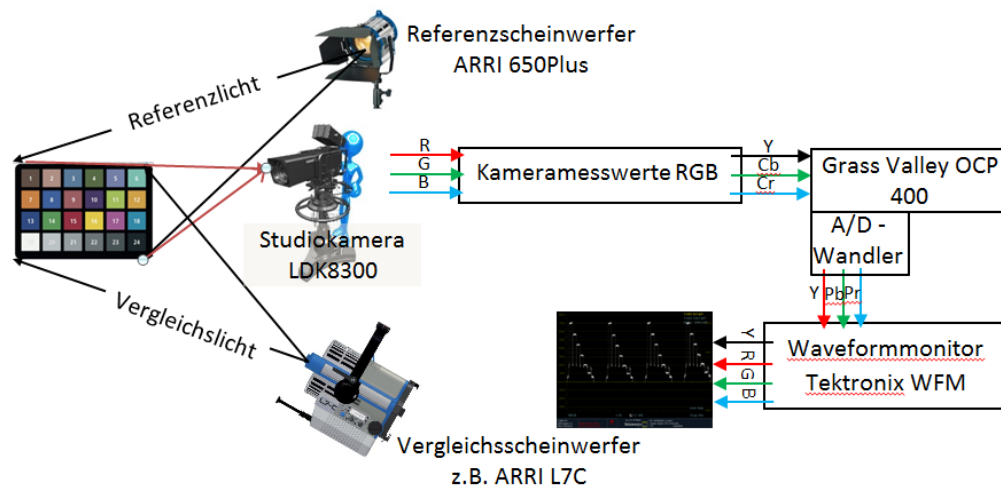


Abbildung 43: Testaufbau mit Stufenlinsenscheinwerfern im Fernsehstudio der Hochschule Mittweida (technisch).

²²⁵ Vgl. http://www.technoteam.de/e898/e97/e305/e408/jof2k_ger.pdf s. 2 [Stand: 18.12.2013]

²²⁶ Vgl. <http://www.pepla.de/original-texte/leuchtdichtemessung.htm> [Stand: 18.12.2013]

²²⁷ Vgl. http://www.technoteam.de/e898/e97/e305/e408/jof2k_ger.pdf s. 2 [Stand: 18.12.2013]

²²⁸ Ackermann 2006, S. 98

²²⁹ http://www.grassvalley.com/products/ldk_8300 [Stand: 18.12.2013]

²³⁰ Vgl. <http://de.wikipedia.org/wiki/YCbCr-Farbmodell> [Stand: 18.12.2013]

Dieses „bei Component Video benutzte YPbPr-Signal besteht aus dem Helligkeitssignal „Y“ sowie den Farbabweichungssignalen „Pb“ für die Abweichung von Grau auf einer Blau-Gelb-Skala sowie Pr“ für die Abweichung von Grau auf einer Rot-Türkis-Skala“²³¹ und gibt Aufschluss über die Position des Farbvektors im YPbPr-Diagramm. YPbPr ist somit die ursprünglich analoge Version des digitalen YCbCr.²³² Diese analogen Farbsignale (Rot, Grün, Blau) können nun mit der bereits erwähnten Messtechnik, der Bildtechnik vom Typ Grass Valley OCP 400 (im Weiteren nur OCP genannt), ausgewertet und bearbeiten werden.

Der Waveformmonitor Tektronix WFM 8300 stellt diese Farbsignale in verschiedenen Formen dar. Die im Test am häufigsten verwendete Darstellungsform war die sogenannte Parade. Diese kann die YPbPr-Werte und die dafür benötigten YRGB-Werte sehr gut darstellen. Die genutzte „YRGB“-Paradedarstellung, stellt die einzelnen übertragen anlogenen Farbwerte Rot, Grün, Blau und Y für Helligkeit nebeneinander mit einem Spannungswert in Millivolt, dar (siehe Abb. 44).

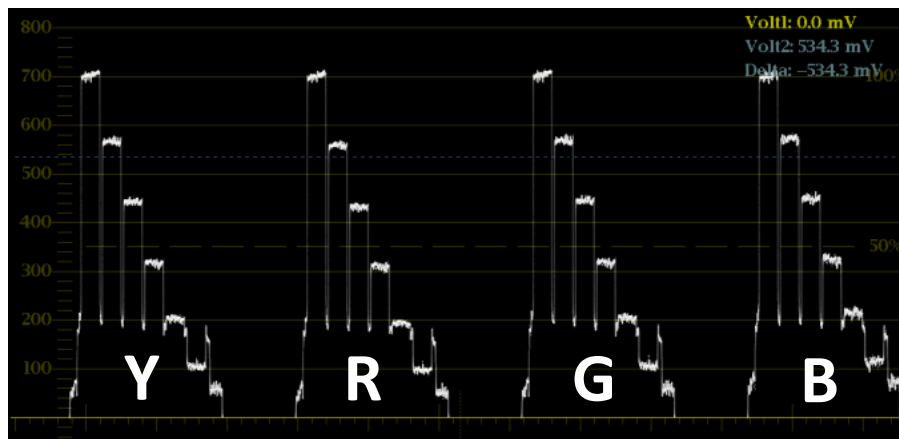


Abbildung 44: Waveformmonitor mit Parade Darstellung im YRGB-Farbmodell einer Farbreihe des Colorcheckers. Am Beispiel eines Weißabgleichs.

Des Weiteren kann der Waveformmonitor diese Farbwerte auch in der sogenannten Vektorskop-Darstellung anzeigen. Diese ist für das kalibrieren des Schwarzwertes eines Kamerabildes sehr hilfreich. Ein solch modernes Messgerät hat natürlich noch viele weitere Darstellungs- und Ablesefunktionen, auf die in der vorliegenden Arbeit nicht weiter eingegangen wird.

Diese Nachbearbeitung des Kamerasignals an einer Bildtechnik mit einem Waveformmonitor ermöglicht eine sehr präzise Nachkorrektur der einzelnen RGB-Werte der Kamera. Da unterschiedliche Lichtquellen auch unterschiedliche Farbspektren besitzen, muss man mit der Bildtechnik diese einzelnen RGB-Werte der Kamera anpassen, sozusagen einen entsprechenden Weißabgleich auf die vorhandene Lichtquelle vornehmen. Dieser Weißabgleich

²³¹ http://de.wikipedia.org/wiki/Component_Video [Stand: 18.12.2013]

²³² Vgl. ebd.

kann nur auf eine bestimmte Fläche, mit einer bestimmten Lichtmischung vorgenommen werden. Mit Lichtmischung ist hierbei die Größe der RGB-Anteile am Weiß gemeint, welches per Weißabgleich an der Bildtechnik definiert wird. Ändert sich das Gleichgewicht dieser Farbanteile (RGB) durch Dimmen der Lichtquellen, Mischlichtsituationen oder -verfahren der Kamera, ändert sich auch das Bild der Kamera. Dieses Kamerabild erhält im schlimmsten Fall einen Farbstich, der vom menschlichen Auge als unangenehm wahrgenommen wird.²³³ Somit gilt es für die Bild- und Lichttechniker im Fernsehstudio, dieses Rein-Weiß für das Kameraabbild im Vorfeld sowie während der Sendedauer einer TV-Show etc. so optimal wie möglich zu halten.

Dies kann durch Anpassung der Lichtquellen durch die Lichttechniker eines Fernsehstudios, um Mischlichtsituationen zu vermeiden, im Vorfeld realisiert werden. Im normalen Fall verwendet man dafür sogenannte Konvertierungsfilter z.B. CTO (Convert to Orange)²³⁴. Bildtechniker können nur bedingt während einer TV-Show den Weißabgleich beeinflussen, da es im Sendebetrieb selten eine Rein-Weiße-Fläche zum Ausmessen der Farbanteile im Kamerasingnal gibt. Aber auch die Lampenhersteller können im Vorfeld eine gewisse Einheitlichkeit ihrer Farbspektren beachten, um solche Farbstiche zu vermeiden. Genau hier wird in der vorliegenden Arbeit mit den Tests angesetzt und es werden die Unterschiede der Farbanteile (RGB) der o.g. spezifischen Scheinwerfertypen aufgezeigt (siehe 4.1).

In dem Studiotest wurden, mit Hilfe der o.g. Signalkette und Messmittel, 11 Vergleichstests zwischen Referenz- und Vergleichsscheinwerfern durchgeführt und die hierbei in Tab. 22 dargestellten Ziele verfolgt:

Test	Referenzscheinwerfer (RSW), Vergleichsscheinwerfer (VSW), Vergleichsbedingungen, Zielsetzung für ein Fernsehstudio (FS)
1	ARRI650Plus mit einem Weißabgleich an der OCP
	ARRI L7C ohne Weißabgleich am OCP (Weißabgleich vom ARRI650Plus), sondern einer Anpassung am Scheinwerfer durch die vorhandene Einstellungsmöglichkeiten Farbtemperatur (3050K), Dimmfunktion (98%) und Grün-Magenta Korrektur (Green -0,25),
	Zielsetzung: Teilersatz in einem FS durch VSW -> Mischlichtsituation in einem FS. Nachweis, dass eine Anpassung am VSW an den Weißabgleich des RSW möglich ist.
2	ARRI650Plus mit einem Weißabgleich an der OCP
	ARRI L7C ebenfalls mit einem Weißabgleich am OCP
	Zielsetzung: Vollersatz in einem FS durch VSW -> Volllichtsituationen in einem FS. Nachweis, durch einen optimalen Weißabgleich von RSW und VSW jeweils am OCP.
3	ARRI650Plus mit einem Weißabgleich an der OCP
	ARRI L7C mit einem Farbgleich am OCP auf das Farbfeldnummer 2 (Hutton, Fernsehrelevant)
	Zielsetzung: Vollersatz in einem FS durch VSW -> Volllichtsituationen in einem FS. Nachweis, durch einen optimalen Weißabgleich von RSW am OCP und VSW auf Farbfeldnummer 2 (Hutton) am OCP

²³³ Vgl. Ackermann 2006, S. 98

²³⁴ Vgl. Ebd.

Test	Referenzscheinwerfer (RSW), Vergleichsscheinwerfer (VSW), Vergleichsbedingungen, Zielsetzung für ein Fernsehstudio (FS)
4	ARRI650Plus mit einem Weißabgleich an der OCP
	ARRI L7C ohne Weißabgleich am OCP (Weißabgleich vom ARRI650Plus),
	Zielsetzung: Teilersatz in einem FS durch VSW -> Mischlichtsituation in einem FS. Nachweis, da keine Anpassung am VSW an den Weißabgleich des RSW.
5	ARRI650Plus mit einem Weißabgleich an der OCP
	ARRI L7T ebenfalls mit einem Weißabgleich am OCP
	Zielsetzung: Vollersatz in einem FS durch VSW -> Volllichtsituationen in einem FS. Nachweis, durch einen optimalen Weißabgleich von RSW und VSW jeweils am OCP.
6	ARRI650Plus mit einem Weißabgleich an der OCP
	ARRI L7T ohne Weißabgleich am OCP (Weißabgleich vom ARRI650Plus)
	Zielsetzung: Teilersatz in einem FS durch VSW -> Mischlichtsituation in einem FS. Nachweis, da keine Anpassung am VSW an den Weißabgleich des RSW.
7	ARRI650Plus mit einem Weißabgleich an der OCP
	ARRI L7T ohne Weißabgleich am OCP (Weißabgleich vom ARRI650Plus), sondern einer Anpassung am Scheinwerfer durch die vorhandene Einstellungsmöglichkeiten Farbtemperatur (3100K), Dimmfunktion (99%) und Grün-Magenta Korrektur (Green -0,19)
	Zielsetzung: Teilersatz in einem FS durch VSW -> Mischlichtsituation in einem FS. Nachweis, dass eine Anpassung am VSW an den Weißabgleich des RSW möglich ist.
8	ARRI650Plus mit einem Weißabgleich an der OCP
	ARRI 650Plus mit WD ½ Folie (siehe weiter unten) jedoch ohne Weißabgleich am OCP (Weißabgleich vom ARRI650Plus ohne Folie)
	Zielsetzung: FS typische Anpassungen des VSW -> Mischlichtsituation in einem FS. Nachweis, dass übliche Anpassungen am VSW den Weißabgleich beeinflussen.
9	ARRI650Plus mit einem Weißabgleich an der OCP
	ARRI True Blue T1 auf 63% gedimmt ohne Weißabgleich am OCP (Weißabgleich vom ARRI650Plus)
	Zielsetzung: FS typische Anpassungen des VSW -> Mischlichtsituation in einem FS. Nachweis, dass übliche Anpassungen am VSW den Weißabgleich beeinflussen.
10	ARRI650Plus mit einem Weißabgleich an der OCP
	Quartzcolor Polaris auf 73% gedimmt ohne Weißabgleich am OCP (Weißabgleich vom ARRI650Plus)
	Zielsetzung: FS typische Anpassungen des VSW -> Mischlichtsituation in einem FS. Nachweis, dass übliche Anpassungen am VSW den Weißabgleich beeinflussen.
11	ARRI L7C mit einem Weißabgleich am OCP
	ARRI L7T ohne Weißabgleich am OCP (Weißabgleich vom ARRI L7C).
	Zielsetzung: Teileinsatz in einem FS durch VSW -> Mischlichtsituation in einem FS. Nachweis, da keine Anpassung am VSW an den Weißabgleich des RSW.

Tabelle 22: Vergleichstests zwischen Referenzscheinwerfern und Vergleichsscheinwerfern mit Vergleichsbedingungen und Zielsetzung.

Die Messungen wurden jeweils einzeln pro Scheinwerfer durchgeführt und zum Zweck der Vergleichbarkeit in die o.g. Vergleichsgruppen (1 bis 11) zusammengefasst.

Während der einzelnen Tests mit den Scheinwerfern wurden die in Tab. 23 zusammengestellten Parameter, bezüglich Scheinwerfertemperatur, Abstand, Farbtemperatur und Leistung, gemessen bzw. eingehalten:

Parameter Scheinwerfertyp	Temperatur am Scheinwerfer (° C)				Abstand in m	Farbtemperatur in (K)		Gedim- mt in %	Spann- ung (V)	Strom (A)
	unten Gehäuse	hinten Gehäuse	Stufen- linse	Farbtafel		Am Checker	Am SW			
ARRI L7C	29	22	22	17	2,54	3050	3110		230	0,66
ARRI 650 Plus	68	97	165	21	2,73	3120	3120		227	2,79
ARRI 650Plus mit WD			84		2,02	3070	3070			
Quartzcolor Polaris	32	53	170	19	2,30	2900	2950	73		
ARRI True Blue T1	43	76	160	19	2,83	2950	3000	63		
ARRI L7T	34	25	28	18	2,55	3020	3010			

Tabelle 23: Messergebnisse von Temperatur, Abstand, Farbtemperatur, Spannung und Strom.

Für die Farb- und Beleuchtungsstärkemessung wurde das Illuminance Meter T-1 und Chromameter XY-1 von Minolta verwendet. Abstand und Temperatur wurden mit den Messgeräten Kaleas Laserabstandsmesser LDM 500 und Kaleas Infrarot Temperatur Scanner 34020 aufgenommen. Hierbei ist klar geworden, dass das Chromameter XY-1 von Minolta für die Messung der Farbtemperatur eines LED-Stufenlinsenscheinwerfers keine aussagekräftigen Werte liefert. Dies liegt daran, dass die Messsensoren dieses Messgerätes nicht exakt die Normfarbwerte der CIE abbilden können und somit die steilen Flanken im LED-Spektrum zu Messabweichungen führen.²³⁵

Weiterhin wurden die Messungen am OCP bei annähernd gleicher Blende (4.0), Farbtemperatur (3200K), Beleuchtungsstärke (1200 lx) im Studiotest realisiert.

Die Tests mit und ohne Weißabgleich sollen wie bereits erwähnt Mischlicht- bzw. Volllichtsituationen darstellen. Zum Beispiel stellen die Tests (Test 4 und 6) ohne Weißabgleich an der Kamera eine Mischlichtsituation dar. Dies geschieht durch das bereits erwähnte Phänomen, wenn die Kamera in eine andere Lichtsituation mit anderen Scheinwerfern schwenkt oder fährt und der Bildtechniker den Weißabgleich nicht korrigiert hat. Diese Situation ist durch einen Teilersatz der Scheinwerfer in Fernsehstudios der Fall, weil dann nicht immer alle Scheinwerfer vom selben Typ und Hersteller verwendet werden.

Bei LED-Stufenlinsenscheinwerfern kann man jedoch einen „Weißabgleich“ (Anpassung) am Scheinwerfer (Vergleich 1 und 7) als neuartiges Feature vornehmen und dadurch die Schwankungen im Farbspektrum angleichen.

Weiterhin sollen die Tests (Vergleich 2 und 5) mit einem korrekt ausgeführten Weiß- und Schwarzabgleich die Möglichkeit des vollständigen Ersatzes von Stufenlinsenscheinwerfern mit Halogenleuchtmitteln durch LED-Stufenlinsenscheinwerfer vom selben Typ und Hersteller in einem Fernsehstudio darstellen.

²³⁵ Dennis Jackstien (2014): schriftliche Mitteilung vom 10.02.2014

Die Tests mit den gedimmten (Vergleich 9 und 10) bzw. mit Folie bestückten Scheinwerfern (Vergleich 8) sollen die übliche Vorgehensweise in einem Fernsehstudio simulieren. Dimmen von Scheinwerfern in Fernsehstudios ist absolut notwendig, da auf allen Lichtpositionen dieselbe Beleuchtungsstärke einzuhalten ist. Weiterhin wird sehr oft versucht, mit WD-Folie (White Diffusion) ein angenehmeres, weiches Licht zu erzeugen und harte Lichtschatten zu vermeiden. Das Licht wird durch die Folie gestreut und die Schatten werden somit weicher, was in vielen Fällen auf dem Bildschirm angenehmer und besser aussieht.²³⁶ Auch dadurch kann es folglich zu unterschiedlichen Farbspektren, innerhalb eines Scheinwerfertyps z.B. ARRI 650Plus, kommen.

Im Testverlauf wurde der Mittelwert der ermittelten Spannungswerte der RGB-Farbanteile der einzelnen Farbreihen des X-Rite-Colorcheckers für die jeweiligen Tests mit Hilfe der Linien-Auswahl und dem Cursor vom Waveformmonitor der Bildtechnik abgelesen. Dabei gab es eine Messungenauigkeit von $< 0,005$ V um den abgelesenen Messwert. Anschließend wurde dieser in eine Excel-Tabelle übertragen und den weiteren Umrechnungsschritten zugeführt.

4.2.2 Angewandte wissenschaftliche Methode der Farbmessung und der Berechnung der Farbabstände (Delta E im CIELAB2000)

Üblicherweise werden Lichtquellen mit einer Farbmessung (siehe Kapitel 2.1.1) im Labor auf ihre Farbwiedergabe und Qualität mit dem sogenannten Spektralverfahren getestet und ausgemessen. Zusätzlich gibt es noch das sogenannte Dreibereichsverfahren²³⁷ und weitere, auf die nicht weiter eingegangen werden soll. Das Spektralverfahren ist das genaueste, aber auch das komplizierteste Farbmessverfahren²³⁸ und bedarf sehr teuren Messgeräten, z.B. einem Spektrometer. Dieses Verfahren zerlegt das Licht einer Lichtquelle in ihre spektralen Bestandteile und liest somit den Spektralbereich einer Lichtquelle aus (entsprechend Kapitel 2.1.1). Hierbei kann nun festgestellt werden, ob ein kontinuierliches Spektrum einer Lichtquelle vorliegt oder ob es starke Einbrüche oder Schwankungen gibt (gemäß Kapitel 2.1.1). Dieses Messverfahren wird z.Zt. noch mit sehr teuren Messgeräten durchgeführt, die zum Vergleichsversuch nicht zur Verfügung standen.

„Selbst ein teures Spektrometer als Messgerät ist für den konkreten Anwendungsfall in einem TV-Studio nicht besser als der WFM. Entscheidend ist doch, was die Kamera sieht! Das Spektrometer versucht in aller Regel, das menschliche Auge abzubilden.“²³⁹

²³⁶ Vgl. <http://www.filterfolie.de/WD-Folien> [Stand: 22.12.2013]

²³⁷ http://www.elv.de/Vom-Licht-zur-Beleuchtung-Teil-2-Licht-und-Farbe/x.aspx/cid_726/detail_36948/print_1 [Stand: 22.12.2013]

²³⁸ Vgl. Loos 1989, S. 69

²³⁹ Dennis Jackstien (2014): schriftliche Mitteilung vom 10.02.2014

Daher wurden zum Aufnehmen der Farbanteile (RGB) die in Kapitel 4.2.1 genannten Messmittel und Verfahren verwendet. Diese Farbanteile können weiterführend über den CIE-XYZ-Farbraum in den CIELAB-Farbraum übertragen werden (siehe Abb. 45).

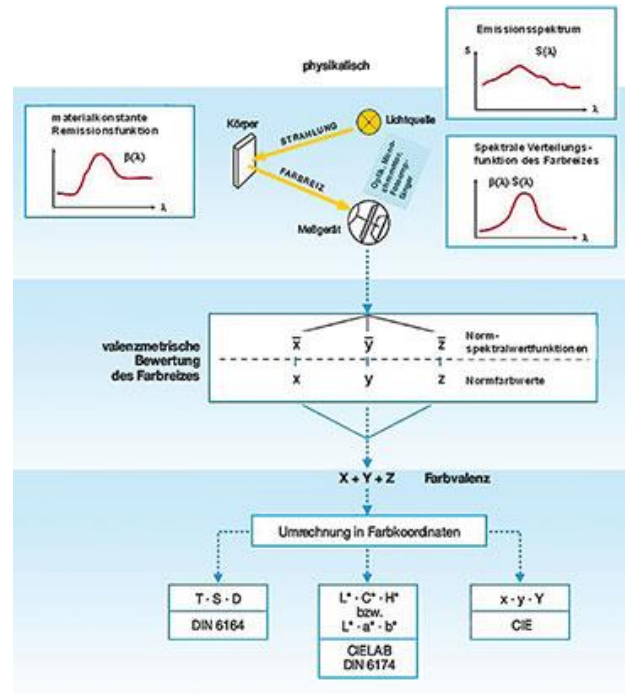


Abbildung 45: Licht- und Farbmessung für reproduzierbare numerische Aussagen.²⁴⁰

Anschließend kann aus den ermittelten Werten des CIELAB-Farbraums (siehe Kapitel 2.1.1) ein Farbabstand (Delta E) zu einer bestimmten festgelegten Normgröße (ARRI 650Plus) berechnet werden.²⁴¹ Weiterführend kann daraus der Farbwiedergabeindex R_a (siehe Kapitel 2.1.1) berechnet werden.

Dieser Farbwiedergabeindex R_a steht, in Bezug der Bewertung von LED-Lichtquellen, aktuell stark in der Kritik. Obwohl er das einzige international anerkannte Messsystem für die Bewertung von Lichtquellen ist.

„Dieser stammt ursprünglich aus den 1960er Jahren und ist konzipiert nach der Farbwiedergabe für den menschlichen Betrachter statt der für eine TV-Kamera.“²⁴²

„Studien, die bereits mit LED-Lichtquellen unternommen wurden, haben gezeigt, dass der üblicherweise verwendete Farbwiedergabeindex in der Beleuchtungsindustrie, für Fernsehern, wegen des schwimmenden weißen Punktes, ungeeignet ist.“²⁴³

²⁴⁰ Vgl. http://www.elv.de/Vom-Licht-zur-Beleuchtung-Teil-2-Licht-und-Farbe/x.aspx/cid_726/detail_36948/print_1 [Stand: 22.12.2013]

²⁴¹ Vgl. Loos 1989, S. 70

²⁴² Vgl. <http://cinescopophilia.com/stop-measuring-led-lights-by-cri-and-use-tlci-instead-says-ebu/> [Stand: 22.12.2013]

„Der Farbwiedergabeindex ist kein eindeutiges Maß für die Farbtreue. Ein hoher CRI bedeutet keinesfalls immer, dass alle Farben gut wiedergegeben werden. Tatsächlich können Lichtquellen mit signifikant anderer spektraler Zusammensetzung als die Referenzquelle den gleichen CRI aufweisen, obwohl sie eine stark abweichende Farbwirkung des bestrahlten Objekts hervorrufen.“²⁴⁴

„Dieser Effekt kann einerseits auf die Metamerie (unterschiedlich zusammengesetzte Lichtspektren können, obwohl ganze Bandbreiten fehlen, den gleichen Farbeindruck hervorrufen) zurückgeführt werden.“²⁴⁵

Der Farbeindruck einer Fläche hängt somit stark von der verwendeten Lichtquelle ab. Als Metamer (bedingt gleich) werden zwei Farbproben bezeichnet, die unter bestimmten Bedingungen die identische Farbvalenzen erzeugen, jedoch unterschiedliche spektrale Remissionskurven haben.²⁴⁶

Der praktisch am häufigsten anzutreffende Fall der Metamerie ist die Beleuchtungsmetamerie. Diese bezeichnet die Übereinstimmung zweier Farben unter einer Bezugslichtart und Abweichung unter anderen Lichtarten bzw. Lichtquellen. Die Ursache der Metamerie sind hier die unterschiedlichen Lichtspektren der jeweiligen Lichtquellen.²⁴⁷

So wird die unter einer Normlichtart D65 (6500 K)²⁴⁸ beleuchtete Fläche gleicher Farbe anders wahrgenommen als dieselbe Fläche bei einer Beleuchtung mit der Normlichtart A (2856 K)²⁴⁹.

Als metameriefrei gilt eine Farbe, deren Delta E bezüglich zwei vereinbarter Lichtquellen nicht größer als 0,5, für ungeübte Beobachter nicht größer als 1,0 ist (Tabelle 7, Kapitel 2.1.1).²⁵⁰

„Einfluss auf den Farbeindruck haben eine Vielzahl von messbaren und subjektiven Einflussgrößen: spektrale Reflexionseigenschaften des Sehobjekts, spektrale Verteilung (Farbton) der Beleuchtung und ihre Intensität (Helligkeit), Stimmungen, Umfeld und manches mehr.“²⁵¹

²⁴³ Vgl. <https://tech.ebu.ch/tlci-2012> [Stand: 22.12.2013]

²⁴⁴ Vgl. http://www.elv.de/Vom-Licht-zur-Beleuchtung-Teil-2-Licht-und-Farbe/x.aspx/cid_726/detail_36948/print_1 [Stand: 22.12.2013]

²⁴⁵ Vgl. <http://www.ledshift.com/LED-CRI-Farbwiedergabeindex.html> [Stand: 22.12.2013]

²⁴⁶ Vgl. [http://de.wikipedia.org/wiki/Metamerie_\(Farblehre\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Metamerie_(Farblehre)) [Stand: 22.12.2013]

²⁴⁷ Vgl. Klein 2004, S. 96

²⁴⁸ Vgl. Loos 1989, S. 29

²⁴⁹ Vgl. Loos 1989, S. 28

²⁵⁰ Vgl. [http://de.wikipedia.org/wiki/Metamerie_\(Farblehre\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Metamerie_(Farblehre)) [Stand: 22.12.2013]

²⁵¹ Vgl. http://www.elv.de/Vom-Licht-zur-Beleuchtung-Teil-2-Licht-und-Farbe/x.aspx/cid_726/detail_36948/print_1 [Stand: 22.12.2013]

Die CIE und verschiedene andere Organisationen arbeiten an einem eindeutigeren Maß für die Charakterisierung der Farbwiedergabe von Lichtquellen. Bis dahin ist der CRI die allgemein akzeptierte Beschreibungsgröße für die Farbqualität einer Lichtquelle oder Beleuchtung.²⁵²

Ein großer Pionier bei der Entwicklung neuer Testmethoden ist Alan Roberts. Er entwickelte, nach dem Vorbild des menschlichen CIE-Modells²⁵³, mit einem Forscherteam (EBU-GROUP ON LED-BASED STUDIO LIGHTS)²⁵⁴ eine neuartige Testmethodik (TLCI) zur Bewertung von Lichtquellen, speziell LED-Lichtquellen.

Der Unterschied zum aktuell bestehenden CRI-Bewertungsverfahren, welches die Lichtquelle direkt bewertet und es dabei metamere Abweichungen entstehen, besteht darin, dass das TLCI-Verfahren eine komplette TV-Kamera und Display nachahmt und somit die Auswirkungen auf die o.g. Hardware berücksichtigt.²⁵⁵ Weiterhin werden für einen Test 24 Testfarben herangezogen und nicht wie im CRI nur 8.

Die TLCI wird in der Praxis mit Hilfe von Software statt echter Hardware (Kamera, Fernseher) realisiert. Die einzige erforderliche Hardware, ist ein Infrarotspektrometer, um die spektrale Verteilung der Lichtquelle zu messen. Die Berechnungen werden auf einem Computer mit einer speziellen Analysesoftware ausgeführt.²⁵⁶ Es entsteht ein Zahlenwert (TLCI) auf einer Skala von 0 bis 100. Die Bedeutung der Nummerierung ist ähnlich wie bei dem Farbwiedergabeindex (CRI), jedoch gibt es wichtige Unterschiede. Anders als der CRI, wo ein Wert von mehr als 90 für die Beleuchtung bei Fernsehproduktionen empfohlen wird, ist bei dem TLCI noch ein Wert von 75 als das Minimum für die Fernsehnutzung akzeptabel (siehe Tab. 24).²⁵⁷

²⁵² Vgl. http://www.elv.de/Vom-Licht-zur-Beleuchtung-Teil-2-Licht-und-Farbe/x.aspx/cid_726/detail_36948/print_1 [Stand: 22.12.2013]

²⁵³ Vgl. <https://tech.ebu.ch/tlci-2012> [Stand: 22.12.2013]

²⁵⁴ Vgl. <https://tech.ebu.ch/groups/led> [Stand: 22.12.2013]

²⁵⁵ Vgl. <http://cinescopophilia.com/stop-measuring-led-lights-by-cri-and-use-tlci-instead-says-ebu/> [Stand: 22.12.2013]

²⁵⁶ Vgl. <https://tech.ebu.ch/tlci-2012> [Stand: 22.12.2013]

²⁵⁷ Vgl. <http://www.gtc.org.uk/tlci-results.aspx> [Stand: 22.12.2013]

TLCI-Wert	Beschreibung
85 - 100	Die Farbabweichungen sind so klein, dass ein Kolorist es nicht korrigieren würde.
75 - 85	Ein Kolorist würde wahrscheinlich eine Farbkorrektur durchführen wollen. Dies könnte er schnell und ohne Probleme realisieren, um zu einem akzeptablen Ergebnis zu kommen.
50 - 75	Ein Kolorist würde auf jeden Fall eine Farbkorrektur vornehmen wollen. Dies würde viel Arbeit benötigen.
25 - 50	Die Farbwiedergabe ist so schlecht, dass ein guter Kolorist eine Farbkorrektur vornehmen könnte, jedoch dieses Ergebnis trotzdem zu schlecht für den Standard TV-Betrieb wäre.
0 - 25	Die Farbwiedergabe ist so schlecht, dass ein guter Kolorist eine lange Zeit zu kämpfen hätte um das Bild zu verbessern, und selbst dann sind die Ergebnisse für den Standard TV-Betrieb nicht akzeptabel.

Tabelle 24: Bewertungstabelle für das TLCI-Verfahren.²⁵⁸

Weiterhin forscht Hr. Poussel mit einem Forscherteam der NIST (National Institute of Standards and Technology) an einer Farbqualitätsskala (CQS) für die Bewertung neuartiger Lichtquellen.²⁵⁹

Diese Farbqualitätsskala (CQS) ist ein quantitatives Maß für die Fähigkeit einer Lichtquelle, um die Farben der beleuchteten Objekte wiederzugeben. Sie entwickelten ein psychophysisches Experiment, um die Lichtqualität der LED-Lichtquellen zu beurteilen.²⁶⁰

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit war es nicht möglich, eine dieser gegenwärtig diskutierten neuen Testmethoden (TLCI und CQS) zu nutzen. Da es wie bereits erwähnt, noch keine weiteren allgemeingültigen Alternativen zum gegenwärtigen Farbwiedergabeindex (CRI/R_a) gibt (unter Vorbehalt). Deshalb wurde aus Vergleichbarkeitsgründen im Folgenden auf den Metamerieindex (DeltaE) des Farbraums CIELAB2000 (Normlichtart A, Gesichtsfeld 10°) und dazugehörigem CRI/R_a ausgewichen.

Um zu diesen o.g. Metamerieindex (DeltaE) des CIELAB2000 und dazugehörigem CRI/R_a zu gelangen, wurden die in der Excel-Tabelle übertragenen RGB-Farbwerte des WFM der einzelnen Scheinwerfertests des Studiotests, wie folgt weiter berechnet (siehe Abb. 46). Weitere Ausführungen inklusive Formeln befinden sich in der Anlage K.

²⁵⁸ Vgl. <http://www.gtc.org.uk/tlci-results.aspx#sthash.svO7x2jb.dpuf> [Stand: 22.12.2013]

²⁵⁹ Vgl. <http://www.armadilloled.com/CQS-Colour-Quality-Scale.htm> [Stand: 22.12.2013]

²⁶⁰ Vgl. http://en.wikipedia.org/wiki/Color_Quality_Scale [Stand: 22.12.2013]

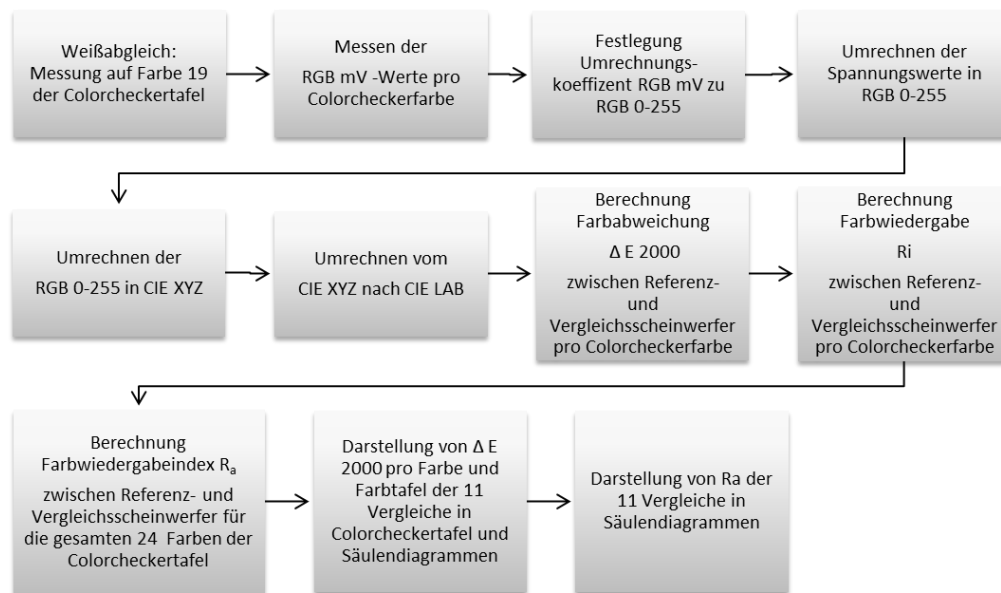


Abbildung 46: Bearbeitungsfolge zur Ermittlung des Farbwiedergabeindex der 24 Colorcheckerfarben bei Referenz- und Vergleichsscheinwerferlicht.

Diese Umrechnung vom mV-Bereich über den RGB-Farbraum, dem XYZ-Farbraum, dem LAB-Farbraum in Delta E des CIELAB2000 erfolgte mit Hilfe von folgenden Berechnungsprogrammen „Colour Conversions Centre (4.0a)“²⁶¹ und „EasyRGB“²⁶² und wurde zusätzlich durch folgendes Programm „CIE Color Calculator von Lindblomm“²⁶³, auf ihre Richtigkeit kontrolliert (siehe Abb. 47).

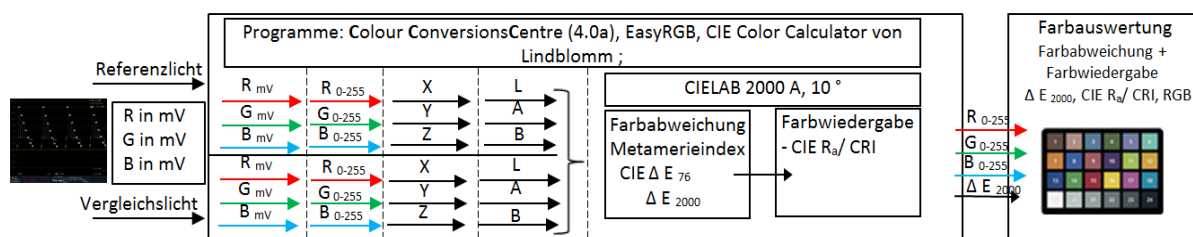


Abbildung 47: Programmtechnische Umrechnungsschritte.

Die Ergebnisse dieser Umrechnungen wurden für jede Colorcheckerfarbe jeweils für die Referenzlichtquelle und die Vergleichslichtquelle in einer selbst entwickelten Colorcheckertafel (Excel 2010) mit RGB-Wert farblich dargestellt, um eventuelle Farbunterschiede optisch zu verdeutlichen.

²⁶¹ <http://ccc.orgfree.com/> [Stand: 22.12.2013]

²⁶² <http://easyrgb.com/index.php?X=CALC> [Stand: 22.12.2013]

²⁶³ <http://www.bruceindblomm.com/index.html?ColorCalculator.html> [Stand: 22.12.2013]

4.3 Auswertung des Fernsehstudiotest und weitere Vergleiche

Die Ergebnisse des Studiotests besitzen einen enormen Umfang und sind somit in der Anlage K kurz erläutert und beschrieben. Dabei sind die oben genannten errechneten Werte beispielhaft im eigenständig entwickelten Colorchecker, mit den RGB-Werten der Bezugsquellen, dem Delta E und dem CRI/ R_a des CIELAB2000 dargestellt. Hierbei sind ebenfalls Auszüge aus der Berechnungstabelle enthalten, der komplette Datensatz der gemessenen RGB-Spannungswerte und die umgerechneten RGB-Werte sind jedoch auf der beigefügten CD-ROM (siehe Anlage O) enthalten. Im folgenden Kapitel werden die im Anhang dargestellten Ergebnisse diskutiert und ausgewertet. Ein Ausblick soll den Abschluss dieses Kapitels bilden.

4.3.1 Ergebnisse, Auswertung und Vergleich

Der wichtigste und umstrittenste Punkt in der Vergleichbarkeit von LED-Stufenlinsenscheinwerfern ist die Farbwiedergabe. Um diesen Punkt objektiv bewerten zu können, wurde der o.g. Studiotest realisiert. Anschließend wurden zusätzlich alle errechneten CRI-Werte von den 11 Vergleichstests in einem Diagramm zusammengefasst (siehe Abb. 48).

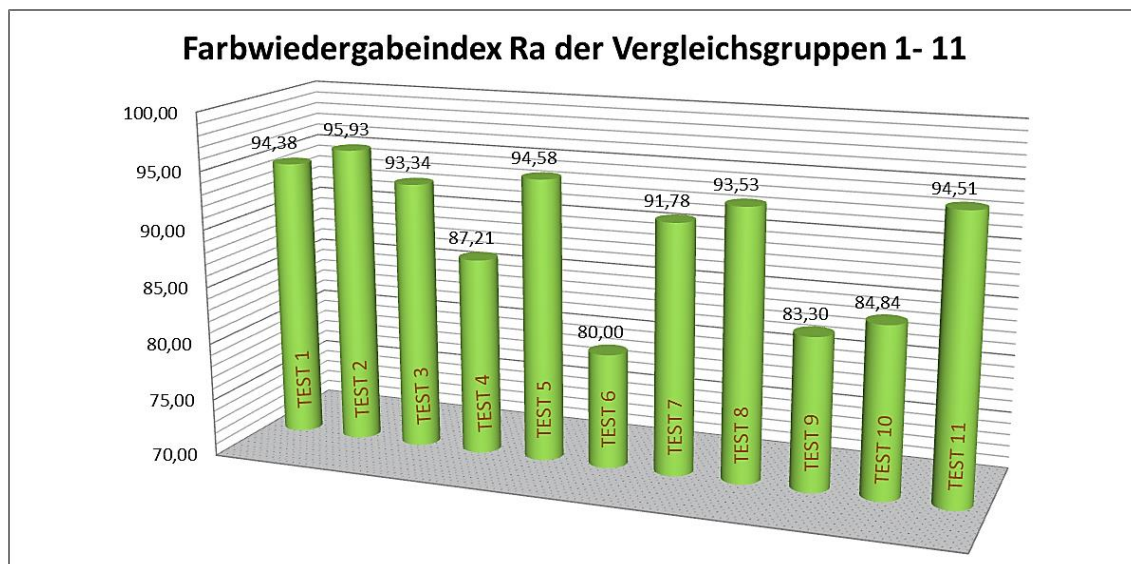


Abbildung 48: Zusammenfassung der Farbwiedergabeindex R_a für die 11 Vergleiche zwischen Referenz- und Vergleichsscheinwerfer.

Hiermit wird deutlich, dass die Ergebnisse von Test 2 mit $R_a = 95,93$ und Test 5 mit $R_a = 94,58$ des durchgeführten studiorelevanten Testaufbaus, den vom Hersteller ermittelten Farbwiedergabeindex (siehe 4.1.2) der neuartigen LED-Stufenlinsenscheinwerfer bestätigen. Da der Weißabgleich (Farbdifferenz ΔE 2000 der Farbe 19 (Weiß) = 0) hierbei korrekt am

OCP durchgeführt wurde, simuliert dieser Test wie bereits erwähnt, einen vollwertigen Ersatz aller Scheinwerfer in einem Fernsehstudio durch LED-Stufenlinsenscheinwerfer.

In der Anlage M stellt Abb. 85 den Mittelwert der Farbabweichungen der 24 Colorcheckerfarben für diese beiden Vergleiche (Test 2 und 5) dar.

Weiterführend zeigen die Ergebnisse von Test 1 und 7 mit einer Anpassung am Scheinwerfer durch die vorhandenen Einstellungsmöglichkeiten auf Farbfeld 19 (Weiß) des Colorcheckers sehr gute und fernsehstudiotaugliche Ergebnisse. Diese Tests stellen wie bereits erwähnt, Mischlichtsituationen mit konventionellen Stufenlinsenscheinwerfern in einem Fernsehstudio dar. Hierbei zeigt Abb. 86 in der Anlage M Mittelwert der Farbabweichungen der 24 Colorcheckerfarben für diese beiden Vergleiche.

Der Mittelwert der o.g. Tests beträgt $R_a = 94,17$ und ist somit laut Tab. 6 in Kategorie 1A ($R_a > 90$) einzuordnen und für eine farbkritische Umgebung wie Fernsehstudios einsetzbar.

Darüber hinaus verdeutlichen die Ergebnisse jedoch auch Unterschiede der Farbwiedergabe von min. $R_a = 80$ bei Test 6 bis max. $R_a = 95,93$ bei Test 2 zwischen den einzelnen LED-Stufenlinsenscheinwerfern (Test 1 – 7 und 11). Weiterhin werden auch Unterschiede im Farbwiedergabeindex (min. $R_a = 83,30$ Test 9 und max. $R_a = 93,53$ Test 8) innerhalb der Halogenlichtquellen sichtbar (Test 8 - 10). Im Vergleich zum LED-Stufenlinsenscheinwerfer mit Anpassungen am Scheinwerfer (Test 1) sind diese Unterschiede sehr deutlich (Abb. 49).

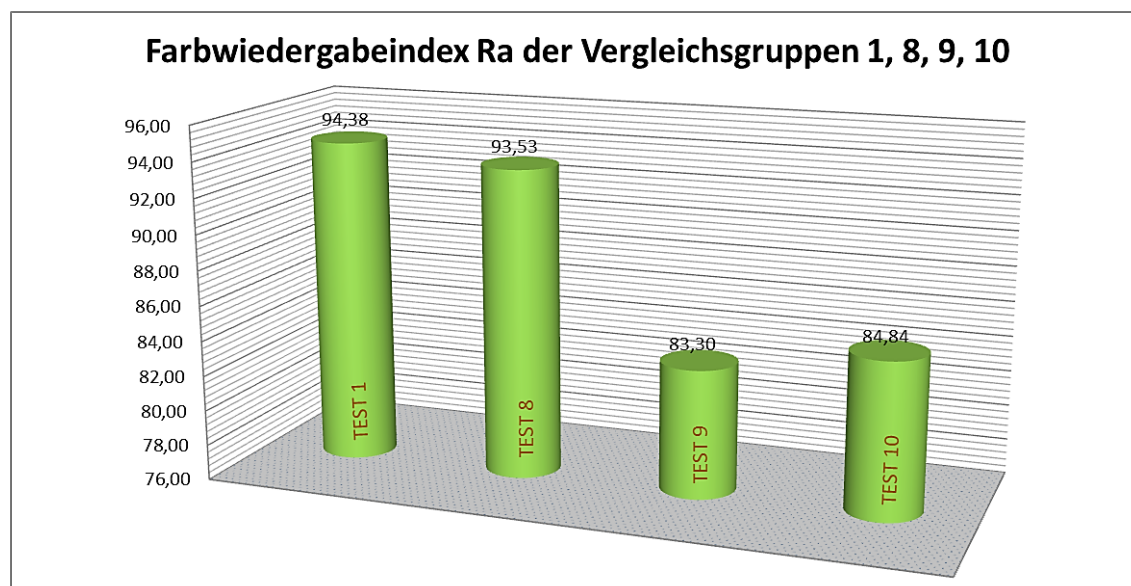


Abbildung 49: Auswertungsdiagramm mit Farbwiedergabeindex R_a für die Vergleiche 1, 8, 9 und 10 zwischen Referenz- und Vergleichsscheinwerfer.

Diese Unterschiede im Farbwiedergabeindex R_a zwischen den am Scheinwerfer angeglichenen LED-Stufenlinsenscheinwerfer (Test 1, $R_a = 94,38$) und den konventionellen Stufenlinsenscheinwerfern mit Folie (Test 8, $R_a = 84,84$) oder gedimmt (Test 9, $R_a = 93,53$ und Test 10, $R_a = 83,30$) ohne Weißabgleich, relativiert jedoch den so hoch eingeforderten Farbwieder-

gabeindex von Lichtquellen. Durch das Dimmen und das Verwenden von Folien wird ein teils starker Abfall der Farbwiedergabe deutlich (Test 8-10). Dieses Vorgehen ist jedoch in renommierten Fernsehstudios allgegenwärtig und wird täglich praktiziert. Durch diese entstandenen Mischlichtsituationen, zwischen gedimmten bzw. mit Folie versehenen Stufenlinsenscheinwerfern und konventionellen Stufenlinsenscheinwerfern, entsteht ebenfalls eine starke Farbabweichung. Daraus resultiert ein niedrigerer Farbwiedergabeindex als der des Scheinwerfers allein. Mit den Einstellungsmöglichkeiten der neuartigen LED-Stufenlinsenscheinwerfer kann man diese Farbwiedergabeunterschiede innerhalb dieses Lichtquellentyps sehr gering halten (Test 1, $R_a = 94,38$ und Test 7, $R_a = 91,78$). Jedoch sind LED-Stufenlinsenscheinwerfer ohne Angleichungen am Scheinwerfer (Test 4 und 6) in einer Mischlichtsituation, also ohne die Hilfe eines speziell auf diesen Scheinwerfertyp durchgeführten Weißabgleich, mit einem Farbwiedergabeindex von $R_a = 87,21$ Test 4 und $R_a = 80,00$ Test 6 für eine farbkritische Umgebung wie ein Fernsehstudio schlecht geeignet.

Abschließend wird deutlich, dass durch Folien und Dimmen der konventionellen Stufenlinsenscheinwerfer die Farbwiedergabe ebenfalls teils stark beeinträchtigt wird (Übergang von Farbwiedergabestufe 1A zu 1B). Jedoch ist, wie bereits erwähnt, für ein Fernsehstudio ein Farbwiedergabeindex von größer 90^{264} vollkommen ausreichend. Somit relativiert sich der Unterschied der Farbwiedergabe der LED-Stufenlinsenscheinwerfer bei Mischlichtsituationen, gegenüber konventionellen Stufenlinsenscheinwerfern sehr stark. Allgemein kann man jedoch schlussfolgern, dass der Farbwiedergabeindex wie bereits erwähnt, nur bedingt Aufschluss über die genauen Farbabweichungen liefert. Entscheidender ist der errechnete Delta E-Wert der Vergleichsgruppen. Hierbei kann man entsprechend Abb. 87 in Anlage M erkennen, dass bei allen Vergleichen mit den LED-Stufenlinsenscheinwerfern und korrekt ausgeführtem Weißabgleich (Test 1-3, 5, 7) eine starke Abweichung (MW von Delta E ≥ 2) in den Farbfeldern 4, 12, 14 und eine geringe Abweichung (MW von Delta E $\geq 1 \leq 2$) in den Farbfeldern 1, 2, 6, 7, 9, 11, 15, 16, 17, 18, 24 in Bezug auf den konventionellen Stufenlinsenscheinwerfer zu erkennen ist (siehe Anlage L). Die Farbabweichung Delta E der anderen noch nicht erwähnten Farbfelder liegt unter dem Wert 1 und ist somit laut Tab. 7 nur für ein geübtes Auge bemerkbar. Dies wird noch deutlicher, wenn die Farbdifferenz ΔE_{2000} der 24 Colorcheckerfarben der 5 Vergleiche 1, 2, 3, 5 und 7 kumuliert werden (siehe Abb. 88, Anlage M). Dies liegt a.m.S. daran, dass der CIELAB2000-Farbraum dem Grünanteil im Farbspektrum eine sehr hohe Bedeutung zukommen lässt.

Bei den Vergleichsgruppen ohne Weißabgleich sind teils sehr starke Farbabweichungen zwischen den einzelnen Farbfeldern, der zu testenden Lichtquellen und der Referenzlichtquelle, zu erkennen. Dies lässt sich wiederum an Hand der RGB-Werte vom selbstentwickelten Colorchecker (siehe Anlage L) besser aufschlüsseln.

²⁶⁴ Vgl. Ackermann 2006, S. 17

Allgemein kann man dabei erkennen, dass der Grünanteil der Farbspektren relativ gesehen eher konstant bleibt, jedoch der Blau- und Rotanteil teilweise sehr stark abweicht. Zum Beispiel kann man beobachten, dass der Rotanteil der gedimmten und mit Folie behafteten Scheinwerfer ohne Weißabgleich (Test 8, 9, 10) deutlich über dem der Bezugsquelle liegt, der Blauanteil jedoch darunter. Dies liegt daran, dass z.B. beim Dimmen eines Halogenscheinwerfers bzw. einer Lichtquelle, die Farbtemperatur sinkt und somit der Farbort in der CIE-Normfarbtafel entlang der Planckschen-Kurve Richtung Rot wandert (siehe Kapitel 2.2.1).

Bei den LED-Vergleichsgruppen lässt sich erkennen, dass der Rot- und Grünanteil der Test mit Weißabgleich (Test 1-3, 5, 7) eher konstant bleibt, jedoch der Blauanteil teils stark abweicht. Zum Beispiel gibt es bei fast allen Farbfeldern mit hohem Blauanteil eine Abweichung des Blauanteils des Test-Scheinwerfers, die über dem der Bezugsquelle liegt. Bei den restlichen Farbfeldern des Colorcheckers ist der Blauanteil im Vergleich zur Bezugsquelle eher niedriger. Bei den o.g. Tests 4 und 6 der LED-Stufenlinsenscheinwerfer ohne Weißabgleich lässt sich dazu noch erkennen, dass nicht nur der Blauanteil stark abnimmt, sondern auch der Rotanteil etwas nach unten abweicht. Dies kann an der Verteilung des Farbspektrums der Lichtquelle liegen (siehe 4.1.2). Hierbei wird deutlich, dass es starke Einbrüche im Blauanteil sowie eine Abscheidung des hinteren Rotanteils kommt.

Bei der Auswertung von Test 3 zeigt sich, dass der Rot- und Grünanteil bei Farbfelder mit Blauanteil abnimmt, jedoch der gemessene Blauanteil des Lichtes stark zunimmt. Bei den restlichen Farbfeldern nimmt der Blauanteil teils stark ab, wobei Grün- und Rotanteil eher konstant bleiben. Dies kann an der stufenförmigen Einteilung des Spektrums der Farbe 2 liegen ($R > G > B$).

Generell kann man hierbei feststellen, dass die Einbrüche des Farbspektrums bei Blau dafür zuständig sind, dass die gemessenen Blauanteile teils stark abweichen. Gerade bei blauen Flächen des Colorcheckers ist diese Abweichung sehr deutlich, dies liegt m.A.n. daran, dass die Farbe des Farbfelds von der LED-Lichtquelle nicht ausreichend ausgestrahlt wird und somit auch nicht reflektiert werden kann. Darüber hinaus liegt dieser Einbruch im Farbspektrum (Blau) a.m.S. an der LED bedingten Bauform, z.B. Trübung der Vergussmasse einer LED (siehe 3.1). Letztendlich sind visuelle Vergleiche der selbstentwickelten Colorchecker mit RGB-Farben abseits des Farbwiedergabeindex a.m.S. in Bezug auf Farbtreue und -wiedergabe sehr befriedigend.

Abschließend kann man weiterhin feststellen, dass selbst die LED-Stufenlinsenscheinwerfer vom selben Hersteller Unterschiede in der Farbwiedergabe untereinander aufweisen. Dies wird in folgenden Abb. 50 dargestellt.

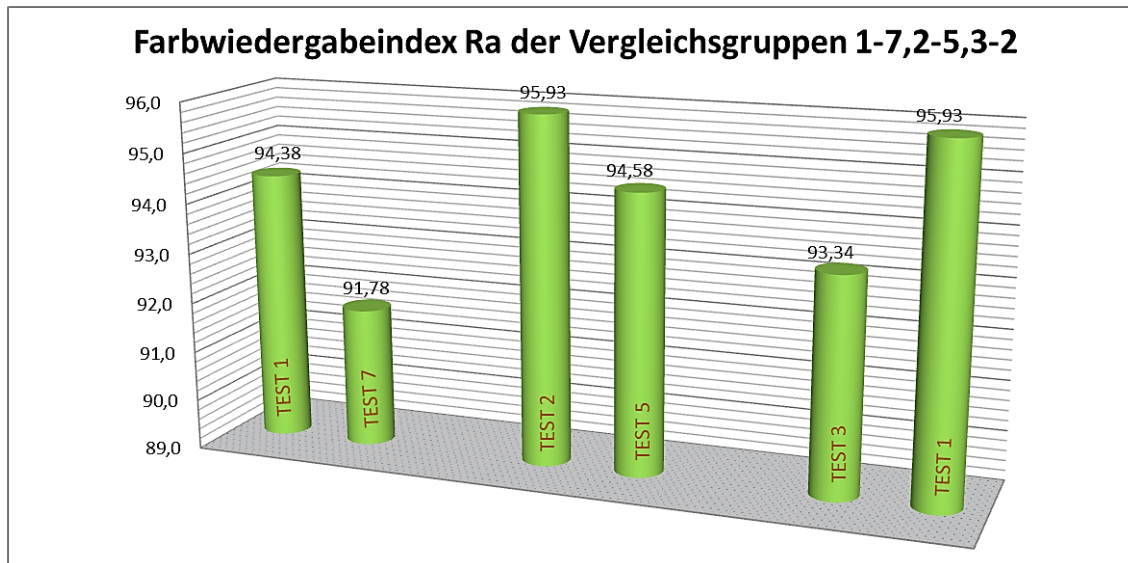


Abbildung 50: Farbwiedergabeindex R_a für die Vergleiche 1, 7; 2, 5 und 3, 2 zwischen Referenz- und Vergleichs-scheinwerfer.

Abb. 50 zeigt auf, dass gleiche Tests mit unterschiedlichen LED-Stufenlinsenscheinwerfern (Test 1 und 7 sowie 2 und 5) auch teilweise sehr unterschiedliche Ergebnisse innerhalb einer Produktgruppe für R_a erbringen. Dies kann daran liegen, dass der L7T auf eine Farbtemperatur spezialisiert ist und somit nur begrenzt korrigierbar ist. Im Test 11 (siehe Abb. 48) spiegelt sich der Unterschied im Farbwiedergabeindex $R_a = 94,51$ zwischen dem L7C und L7T in einer Mischlichtsituation ohne einen Weißabgleich auf die Testlichtquelle deutlich wieder.

Selbst mit den aktuellsten Testmethoden wie TLCI (siehe 4.2.2) werden diese Unterschiede zwischen den LED-Stufenlinsenscheinwerfern deutlich (siehe 4.1.2). Weiterhin zeigen diese Diagramme, dass bei beiden LED-Stufenlinsenscheinwerfern ein TLCI-Wert um die 75 erreicht wird. Diese Farbabweichungen kann man durch eine Nachbearbeitung, laut Zuordnungstabelle (Tab. 24, Kapitel 4.2.2), leicht bzw. mit mittlerem Aufwand beseitigen.

Somit kann man abschließend sagen, dass der ARRI L7C (Test 1 und 2) die besten Ergebnisse erbracht hat und im Vergleich die beste Farbwiedergabe aufweisen konnte. Daher soll sich für die weiteren Betrachtungen, nur auf die technischen Parameter dieses speziellen LED-Stufenlinsenscheinwerfers ARRI L7C, beschränkt werden.

Die bereits angesprochenen technischen Parameter einer Lichtquelle spielen ebenfalls eine sehr entscheidende Rolle für die Vergleichbarkeit von Scheinwerfern. In folgender Tab. 25 wurden die wichtigsten technischen Parameter der beiden Hauptvergleichsscheinwerfer, ARRI 650 Plus und ARRI L7C, für einen Parametervergleich zusammengefasst.

Technischer Parameter	ARRI 650Plus	ARRI L7C
Stromverbrauch:	650W	160W Nominal, 220W Max.
Farbtemperatur:	3200 K	2800 K - 10.000 K
Dimmbarkeit:	0 - 100 % per externen Dimmer	0 -100% Stufenlos mit integriertem Dimmer
Abstrahlwinkel:	12 - 52°	15° - 50°
Gewicht:	2,6 kg	Hybrid: 10.9 kg Active: 8.2 kg
Abmaße (HxBxT):	276 x 220 x 190 mm	Hybrid: 384x374x423 mm Active: 349x374x423 mm
Lichttech. Größen bei FST: Lichttech. Größen bei SST:	1417lx, 14988cd, 9531lm 7694lx, 69819cd, 2403lm	656lx, 6809cd, 3852lm 4996lx, 45472cd, 2130lm
Abstrahlwinkel bei FST: Abstrahlwinkel bei SST:	52° 12°	49° 14°
Durchmesser bei FST: Durchmesser bei SST:	2.9 m 0.6 m	2.7 m 0.7 m
Ansteuerung:	Einfacher Schuko-Stecker	Einfacher Schuko-Stecker, 5-Pin DMX Stecker In und Through, Optional Kontrollierbar am Bedien- und Anzeigefeld , Mini-USB
Temperatur der Lichtquel-	165C	22C
Lebensdauer:	150 h265	50.000 h
Farbkorrektur:	Nur durch externe Farbfolien	Einstellen der Farbtemperatur bzw. des Farbtons, sowie der Grün-Magenta-Korrektur bzw. der Farbsättigung
Kühlung:	Keine Kühlung	Aktive und passive (Hybrid) Kühlung
Zulässige Umgebungstemperaturen:	Muss durch Klimaanlage gekühlt werden	Hybrid: -20°C bis 35°C Active: -20°C bis 45°C
Preis ohne Zubehör: 266	389,00 EUR	2.421,00 EUR

Tabelle 25: Technische Parameter des ARRI 650Plus und ARRI L7C im Vergleich.²⁶⁷

Der Vergleich der technischen Parameter zeigt eindeutige Vorteile des LED-Stufenlinsenscheinwerfers.

Einer der wichtigsten Unterschiede ist der Stromverbrauch. Hierbei verbraucht der ARRI L7C als neuste Generation der LED-Stufenlinsenscheinwerfer nur ein Drittel des Stromes im maximalen Betrieb gegenüber dem konventionellen ARRI 650 Plus mit Halogenleuchtmittel. Eine Musterrechnung unter Annahmebedingungen in Tab. 26 soll die Einsparungsmöglichkeiten am Beispiel des Fernsehstudios Mittweida (4.2.1) verdeutlichen.

²⁶⁵ <http://www.machhell.de/index.php?cat=21&product=4050300296692&sidDE5307DD1FA443FEA85C24EC973B26A=76c0lqu2eh571k9if6glqmt6l0> [Stand: 22.12.2013]

²⁶⁶ http://www.atld.de/product_info.php?products_id=33013&gclid=CIbR3q-8-7sCFUgJwwodQG8AuQ [Stand: 22.12.2013]

²⁶⁷ Lichttechnischen Größen, Abstrahlwinkel und Durchmesser jeweils für einen Abstand von 3 Meter

Scheinwerfertype	Konventioneller Halogen-Stufenlinsenscheinwerfer	LED-Stufenlinsenscheinwerfer
Parameter		
Studiofläche	10,9 m x 8,9 m = 97 m ²	10,9 m x 8,9 m = 97 m ²
Typische 24 Stufenlinsenscheinwerfer	24 x 1000 W = 24,0 KW	24 x 220 W = 5,28 KW
Scheinwerferleistung /m ² -Studiofläche ²⁶⁸	24 KW/97 m ² = 247 W/m ²	5,28KW/97m ² =54,4 W/m ²
E-Leistung für Studiofläche (24 Leuchten)	247 W/m ² x 97 m ² = 24 KW	54,4 W/m ² x 97 m ² = 5.27 KW
Anteil Horizontfläche	10,9 m x 4,2 m = 45 m ²	10,9 m x 4,2 m = 45 m ²
E-Leistung Horizontfläche (Angenommen 11 Leuchten)	247 W/m ² x 45 m ² = 11,1 KW	54,4 W/m ² x 45 m ² = 2,44 KW
Gesamtenergie Scheinwerfer	35,1 KW	7,71 KW
Energieleistung Klimaanlage bei Gleichzeitigkeitsfaktor 0,6 ²⁶⁹ der SW und Leistungszahl 4 ²⁷⁰ (Klimaanlage)	35,1 KW x 0,6 x 0,25 = 5,2 KW	7,71 KW x 0,6 x 0,25 = 1,1 KW
Gesamtenergieleistung	40,3 KW	8,81 KW
Energieverbrauch bei 250 h/Monat	10.075 KWh	2.202 KWh
Energieverbrauch bei 3.000 h/Jahr	120.900 KWh	26.430 KWh
Stromkosten/Jahr (0,086 €/KWh) ²⁷¹	10.397,- €	2.273,- €
Lebensdauer Leuchtmittel	200 h	50.000 h
Ersatzleuchtmittel /Jahr bei 3000 h/Jahr und Gleichzeitigkeitsfaktor 0,6	3000 h/200h x 0,6 x 35 = 315 Stk/Jahr	
Kosten Ersatzmaterial/ Leuchtmittel z.B. OSRAM CP71 ²⁷² ca. 15 €	15,- €	
Gesamtkosten Ersatzmaterial	4.725,- €	
Reparaturstd. bei 15 min/ Leuchtmittel-austausch	315 x 15/60 = 79 Std/Jahr	
Reparaturkosten/Jahr bei 80 €/Std. ²⁷³	6.320,- €	
Gesamtkosten Instandhaltung	11.045,- €	
Gesamtbetriebskosten/ Jahr	21.442,- €	2.273,- €
Laufende Einsparung durch LED-Stufenlinsenscheinwerfern		19,1 T€/Jahr
Anschaffungspreis für 35 Stk. LED-Stufenlinsenscheinwerfern bei ca. 2.000,- €/Stk.		70 T€
Amortisationszeit		3,66 Jahre

Tabelle 26: Beispielrechnung für Einsparungen durch den Austausch/Einsatz mit LED-Stufenlinsenscheinwerfern.

²⁶⁸ Vgl. Ackermann 2006, S. 142

²⁶⁹ Vgl. Ebd.

²⁷⁰ <http://de.wikipedia.org/wiki/Klimaanlage> [Stand: 22.12.2013]

²⁷¹ <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/155964/umfrage/entwicklung-der-industriestrompreise-in-deutschland-seit-1995/> [Stand: 22.12.2013]

²⁷² http://www.osram.de/osram_de/produkte/lampen/speziellampen/halogen-Metall dampflampen/hmi/index.jsp?productId=ZMP_109284 [Stand: 22.12.2013]

²⁷³ <http://www.gulp.de/kb/st/stdsaetze/sstext.html> [Stand: 22.12.2013]

Konkret heißt dies, dass man in einem kleinen Fernsehstudio wie in der HSMW schon rund 94,5 KWh/Jahr Energieleistung oder 8.124,- €/Jahr Energiekosten einsparen könnte. Wenn noch die Instandhaltungskosten (Ersatzteile + Lohnkosten) für den häufigen Leuchtmittelaustausch hinzugezogen werden, erhöhen sich die laufenden Einsparungen auf ca. 19 T€. Bei angenommenen Anschaffungskosten für 35 Stk. LED-Stufenlinsenscheinwerfern für à 2 T€/Stück fallen zwar erst 70 T€ Investitionskosten an, jedoch tritt durch die jährlichen Einsparungen eine Amortisation nach 3,66 Jahre ein. Jedoch können die z.Zt. noch ungenauen Kosten für Wartung, Pflege und Personalschulungen sowie für Zubehör (DMX-Kabel, größere Lichtstellpulte, Booster, neuere Software) die Einsparungen noch beeinflussen.

Wenn man dies auf größere Sendeanstalten überträgt, könnten enorme Kosten eingespart werden. Zusätzlich trägt man zum Umweltschutz bzw. der Energiewende bei und nebenbei wird der eigene Strombedarf noch optimiert.

Ein weiterer großer Vorteil ist, dass man alle Funktionen des LED-Stufenlinsenscheinwerfers mit Hilfe eines DMX-Signals von einem Lichtpult aus steuern kann. Dies bedarf natürlich der Zufuhr eines zusätzlichen DMX-Kabels beim Aufbau (Mehraufwand). Somit ist es bei LED-Stufenlinsenscheinwerfern möglich, zentral und einheitlich eine Farbkorrektur mit Hilfe der Grün-Magenta-Korrektur vorzunehmen. Darüber hinaus kann man das vollständige Farbspektrum dieser Scheinwerfer mit Hilfe der Farbtemperatur anpassen. Somit wird aus einem Kunstlichtscheinwerfer mit einem Handgriff einen Tageslichtscheinwerfer (siehe 2.2). Dies hat den Vorteil, dass keine speziellen Farbfolien für die Farbkorrektur mehr braucht werden. Dies spart Zeit beim Einleuchten und Anpassen der Scheinwerfer, da keine Leiterarbeit mehr notwendig ist. Außerdem spart man sich zusätzliche Scheinwerfer mit verschiedenen Farbtemperaturen und somit Geld. Des Weiteren sind diese neuartigen Scheinwerfer in der Lage, vollständig gesättigte Farben darzustellen und dies auch stufenlos zu wechseln. Somit können diese Scheinwerfer auch als Effektlicht etc. verwendet werden. Dies erspart den Einsatz von herstellereigenen Scheinwerfern, wie bei einem ausschließlich konventionell betriebenen Fernsehstudio. Weiterhin werden für LED-Stufenlinsenscheinwerfer keine externen Dimmer mehr gebraucht. Diese Scheinwerfer kann man direkt am Gerät stufenlos dimmen oder wie o.g. über ein Lichtpult. Dies erspart wiederum sehr viel Zeit beim Aufbau und Strom beim Betrieb der Dimmerpacks²⁷⁴. Des Weiteren kann für die Verwendung im Studio auch auf einen Motorbügel mit Fokus-Steuerung (Pole-Operation) umgerüstet werden, somit kann auch PAN, TILT und FOCUS von der Ferne aus bedient werden.

Darüber hinaus ist die Lebensdauer eines LED-Stufenlinsenscheinwerfers im direkten Vergleich rund 333-mal länger, als bei herkömmlichen Halogenleuchtmitteln. Dies macht die Anschaffung und das umständliche Wechseln dieser Leuchtmittel überflüssig und spart ebenfalls Geld und Zeit (siehe Tab. 25).

²⁷⁴ Externer Dimmer für mehrere Scheinwerfer (Pack)

Ein ebenfalls sehr großer Vorteil ist die Temperatur der LED- Stufenlinsenscheinwerfer im Gegensatz zu konventionellen Leuchtmitteln. Diese sind rund 10-mal²⁷⁵ heißer als ihr „kalter Kollege“ der Halbleitertechnik. Denn zum einen ist es ein absolut kühler Lichtstrahl, der keine Infrarot- oder UV-Strahlung und somit keine Hitze nach vorn abgibt, sodass sich z.B. die Darsteller einer Fernsehshow im Lichtstrahl wohltemperiert fühlen können.²⁷⁶ Zum Anderen, bleibt die Umgebungstemperatur z.B. ein Fernsehstudio deutlich kälter und muss somit nicht so stark aktiv mit Hilfe von Klimaanlage gekühlt werden. Dies hat den großen Vorteil, dass sehr viel Geld, beim Betrieb der Klimaanlage gespart wird. Weiterhin ist die Planung eines Fernsehstudios dadurch einfacher, da die Belüftung und das Klima bei einem vollwertigen Ersatz durch LED-Lichttechnologie eine eher untergeordnete Rolle spielt.

Des Weiteren ist das bekannte Problem der Mehrfach-Schattenbildung der Additiven Farbmischung mit LED Technologie in der neuen L-Serie von ARRI einwandfrei gelöst. Es sind keine Regenbogenränder oder andere Mehrfachschatten zusehen (Abb. 51).

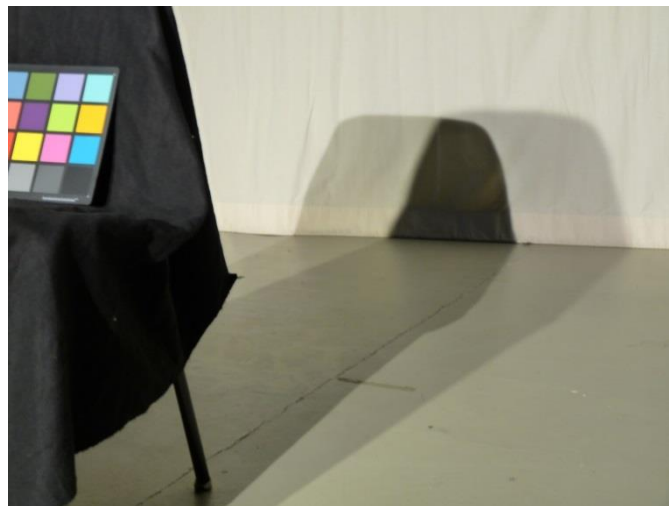


Abbildung 51: Schattenbildung der Stufenlinsenscheinwerfer (links ARRI 650Plus, rechts ARRI L7C).

Abschließend ist darauf hinzuweisen, dass die neuartige LED-Technologie selbst bei Slow-motion-Aufnahmen bis zu 450 fps (Frames per second) vollständig und zu 100% Flicker-frei ist.²⁷⁷ Flicker, ist der subjektive Eindruck von Leuchtdichteänderungen einer Lichtquelle, umgangssprachlich auch als Flackern oder Flimmern des Lichtes bekannt.²⁷⁸

Natürlich haben diese neuartigen Stufenlinsenscheinwerfer auch einige Nachteile, die im Folgenden kurz erläutert werden.

²⁷⁵ Vgl. <http://www.leuchtmittel-ratgeber.de/halogen-lampen-leuchtmittel.php> [Stand: 23.12.2013]

²⁷⁶ Vgl. Arnold & Richter 2012, S. 5

²⁷⁷ Vgl. http://www.framefresh.com/web_delivery/die_neue_led_serie_von_arri_inkl_vergleichschart.pdf [Stand: 23.12.2013]

²⁷⁸ Vgl. <http://de.wikipedia.org/wiki/Flicker> [Stand: 23.12.2013]

Der Größte und bisher am schwierigsten zu lösende Nachteil der LED-Technologie ist die Lichtintensivität bzw. Beleuchtungsstärke. Im Vergleich zu einem konventionellen Stufenlinsenscheinwerfer ist die Beleuchtungsstärke eines neuartigen LED-Stufenlinsenscheinwerfers in der FST bei 3 m Abstand rund die Hälfte schwächer. Im Vergleich zeigt sich jedoch das in der SST bei 3 m Abstand der Unterschied nur noch um den Faktor 0,3 absinkt. Der Lichtstrom bei diesem Vergleich sinkt sogar nur um den Faktor 0,1. Diese Abweichung zwischen den einzelnen Fokussierungen der Scheinwerfer kann an der baubedingt schlechten Effizienz der Halogen-Stufenlinsenscheinwerfer in der SST liegen. LED-Scheinwerfer sind jedoch etwa gleich effizient in SST und FST. Hierbei sollte erwähnt werden, dass andere LED-Scheinwerfer der L-Serie der Firma ARRI bereits Lichtstärken von bis zu 77 kcd (L7-TD, 5600 K, SST CRI > 90)²⁷⁹ erreichen können. Weitere Hersteller von LED-Stufenlinsenscheinwerfern (Tab. 17) zeigen hierbei noch weiteres Potential.

Dieser große Nachteil lässt sich in Zukunft nur durch Forschung und Weiterentwicklung beheben. Jedoch ist an dieser Stelle zu sagen, dass es in heutigen Fernsehstudios mit High-End Kameras keiner großen Beleuchtungsstärken mehr bedarf. Dies liegt daran, dass die Kamerasensoren in den Studiokameras sehr lichtempfindlich sind, somit kommt es dazu, dass eine Beleuchtungsstärke laut Kapitel 2.1.2 von rund < 700 lx für solche Kameras völlig ausreicht.²⁸⁰ Jedoch sind für Filmaufnahmen im Freien und großflächige Ausleuchtungen innerhalb eines Fernsehstudios höher Beleuchtungsstärken sehr erwünscht bzw. teilweise notwendig.

Ein Weiteres großes Problem der LED-Technologie ist die Wärmeentwicklung und -abfuhr (siehe 3.1.2). Dies ist bei der ARRI L-Serie mit Hybrid- und Aktiv-Kühlungssystem gelöst worden. Die aktive Kühlung mit einem Lüftersystem (Ventilator) bringt den Nachteil der Geräuschentwicklung mit sich. Dies kann man durch den Hybridbetrieb des Scheinwerfers bis 80% der Lichtintensität unterbinden.²⁸¹ Erfahrungswerte zeigen jedoch, dass sich dieses Lüftergeräusch nur sehr selten störend auf die Tonaufnahmen in einem Fernsehstudio auswirken²⁸² (siehe 3.1.2). Zudem kann man diese Lüftersysteme selber wechseln und erneuern.

Des Weiteren ist das Gewicht und die Größe des ARRI L7C in Bezug auf den ARRI 650Plus erheblich höher. Somit ist ein L7C circa dreimal so groß wie ein 650Plus und circa vier- bis fünfmal so schwer. Gerade bei der Umrüstung für ein Fernsehstudio auf die o.g. Pole-Operation sind es dann schon 12,5 Kg.²⁸³ Jedoch ist hierbei zu sagen, dass das Gewicht und die Größe eines Scheinwerfers für ein Fernsehstudio eine eher untergeordnete Rolle spielt,

²⁷⁹ Dennis Jackstien (2014): schriftliche Mitteilung vom 14.01.2014

²⁸⁰ Vgl. Ackermann 2006, S. 102

²⁸¹ Vgl. Arnold & Richter 2012, S. 11

²⁸² Dennis Jackstien (2014): schriftliche Mitteilung vom 14.01.2014

²⁸³ Vgl. Arnold & Richter 2012, S. 27

da die Scheinwerfer nicht großartig bewegt werden und üblicherweise ausreichend Platz vorhanden ist (Unter Vorbehalt).

Der Preis des ARRI L7C ist ebenfalls noch zu nennen, der z.Zt. mit 2.421,00 EUR mehr als sechsmal so hoch ist, wie der vom ARRI 650 Plus (389,00 EUR). Dies begründet sich durch den erhöhten Produktionsaufwand der aufwendigen Elektronik, Mikroprozessoren, Software-Routinen, Kalibrierung, computerberechnete Optiken (3 bei jedem L7) etc.. Dadurch ist z.B. der L7C ein exakt kalibrierter Computer der Licht erzeugt. Weiterhin gibt es demzufolge natürlich auch diese vielen Vorteile wie oben beschrieben. Laut Herstellerangabe hat man den Preis aber nach 3 Jahren Betriebseinsatz wieder erwirtschaftet.²⁸⁴ Dies bestätigt sich ebenfalls in der Musterrechnung in Tab. 26, wobei die Amortisation nach 3,66 Jahren eintritt.

Abschließend sind die in Tab. 15 genannten allgemeinen Nachteile der LED-Lichttechnologie zu beachten. Hierbei ganz besonders die intensive, teils augenschädliche Blendung durch kurzwellige Strahlung.

4.3.2 Fazit und Ausblick

Durch das vorangegangene Kapitel kann festgestellt werden, dass die teilweise vorhandenen allgemeinen Zweifel, kritischen Meinungen und Vorbehalte von Beleuchtungsmeistern und Sendeanstalten gegenüber der LED-Technologie sich nur teilweise bestätigt haben.

Im Studiotest stand der ARRI L7C stellvertretend für die neuartigen LED-Stufenlinsenscheinwerfer. Bei diesem konnte bereits die größte Hürde der Farbwiedergabe durch die Anordnung von RGBW-LEDs in der LED-Lightengine erfolgreich gelöst werden. Es konnte jedoch auch beobachtet werden, dass allgemein diese Technologie noch leichte Defizite im blauen Farbspektrum besitzt. Dies könnte a.m.S. durch dynamisches Angleichen der Helligkeit dieser farbigen LEDs teilweise ausgeglichen werden. Weiterhin ist, in Bezug auf die Farbwiedergabe laut 4.3.1, ein Teilersatz durch Anpassungen am Scheinwerfer sowie ein vollwertiger Ersatz aller konventionellen Halogen-Stufenlinsenscheinwerfer in einem Fernsehstudio möglich. Somit wurde bewiesen, dass es möglich ist einen LED-Stufenlinsenscheinwerfer, der sehr präzise in der Farbwiedergabe sowie -korrektur ist, zu bauen. Dies zeigt, dass heutige LED-Stufenlinsenscheinwerfer in Bezug auf die Farbwiedergabe bereits jetzt schon mit konventionellen Stufenlinsenscheinwerfern konkurrieren können und für den Einsatz in einer farbkritischen Umgebung, wie ein Fernsehstudio, geeignet sind. Dies bestätigen auch Videoanalysen der Firma ARRI zu diesem Thema über LED Stufenlinsenscheinwerfern.²⁸⁵

²⁸⁴ Dennis Jackstien (2013): mündliche Mitteilung vom 04.12.2013

²⁸⁵ http://www.arri.de/lighting/lighting_equipment/lampheads/led_lampheads/l_series/ [Stand: 23.12.2013]

Darüber hinaus sind die neuen Möglichkeiten, wie die Grün-Magenta Korrektur, stufenloser Farbtemperatur in großen Bereichen (2800 K - 10000 K), einem stufenlosen, im Scheinwerfer integrierten, Dimmer, in Zukunft unabdingbare Parameter für ein Fernsehstudioeinsatz. Weiterhin können diese Scheinwerfer ohne diverse Folien auf unterschiedliche Farbstimmungen und Lichtfarben stufenlos mit hohen Schaltzyklen und ohne Nachglimmzeiten sofort umgestellt werden. Dies ermöglicht ferner den Einsatz dieses Scheinwerfertyps in der Veranstaltungstechnik und in der Fernsehbranche als Dekorations- und Effektlicht.

„Sehr schön ist die stufenlose Regelung von Lichtfarbe und Leuchtstärke direkt am Gerät oder auch über DMX.“²⁸⁶

Weiterhin wird sich in Zukunft a.m.S. eine drahtlose Ansteuerung und/oder eine Akkubetrieb dieser Scheinwerfer durchsetzen.

„... Akkubetrieb und auch Funksteuerung sind sicher willkommene Ergänzungen für einige Anwender. Die Zukunft wird ... ZigBee (gerne bei der Steuerung von Straßenbeleuchtung verwendet), WiFi oder WDMX über GSM-Frequenzen und Frequenz-Hopping sein.“²⁸⁷

Ein Nachteil den es in diese Technologie auf jeden Fall noch gibt, ist die Beleuchtungsstärke. Was für ein Fernsehstudio vollkommen ausreicht, wird bei z.B. aufwendigen Außendrehaufnahmen in der Filmbranche nicht ausreichend sein. Dort werden Scheinwerfer mit einer Leistung von bis zu 24 KW (ARRIT24) eingesetzt, um reale Mond- und Sonnenlichtsituation nachzuahmen. Dies kann aus heutiger Sicht durch LED-Scheinwerfer noch nicht realisiert werden und wird selbst durch zukünftige Forschung (Kapitel 3), noch einige Jahrzehnte dauern. Hierbei spielt insbesondere die Kühlung der LEDs in einem Scheinwerfer eine große Rolle. Das Wärmemanagement ist meist der begrenzende Faktor für größere Lichtstärken. Aus meiner Sicht sind andere Verfahren, abgesehen von passiver Kühlung und Lüftern, vielleicht durch Flüssigkeiten (z.B. Wasser) ein zukunftsweisender Schritt zur optimalen Kühlung von LEDs.

Heutzutage sind bereits die Beleuchtungsstärken dieser Scheinwerfer für moderne Fernsehstudios mit modernen Studiokameras vollkommen ausreichend. Hierbei werden laut Kapitel 2.1.2 für ein Fernsehstudio Beleuchtungsstärken von 700 lx gefordert. Andere Quellen behaupten sogar, dass Beleuchtungsstärken von 200 lx immer noch ausreichend wären. Jedoch der Mensch, als der begrenzende Faktor, in einem Fernsehstudio mehr Licht benötigen würde.²⁸⁸ Diese Bedingungen können heutige LED-Stufenlinsenscheinwerfer bereits erfolgreich bieten.

²⁸⁶ Uwe Gebauer (2014): schriftliche Mitteilung vom 02.02.2014

²⁸⁷ Dennis Jackstien (2014): schriftliche Mitteilung vom 14.01.2014

²⁸⁸ Dennis Jackstien (2014): schriftliche Mitteilung vom 10.02.2014

„Der L7 ersetzt aktuell je nach Fokussstellung einen 650 – 1000 W Halogenscheinwerfer. LED-Ersatz für 2 KW-Halogenstufenlinsen wird es in den nächsten Jahren geben, aber ein 5 KW-Ersatz z.B. ist noch in weiter Ferne.“²⁸⁹

„In Zukunft werden sich die Kosten für diese Systeme reduzieren und die Lichtausbeute steigen.“²⁹⁰

„Die Fernsehstudios sind mit Energie sparender LED-Beleuchtung ausgestattet ... Allein beim Licht rechnet man mit einer Ersparnis von 95 Prozent.“²⁹¹

Weiterhin wird, wie bereits erwähnt, der z.Zt. hohe Anschaffungspreis sicher noch drastisch sinken. Trotz dieser hohen Anschaffungskosten tritt bereits jetzt durch die Energieeinsparung im Stromverbrauch eine Amortisation laut Kapitel 4.3.1 nach 3,66 Jahren ein. Dies liegt unter anderem jedoch auch daran, dass sich durch die geringe Wärmeabstrahlung des kalten LED-Lichts Klimaenergie für Kühlung der Umgebungstemperaturen einsparen lässt.

Die Vorteile der LED-Technologie sind heutzutage schon so enorm, dass es nicht mehr lange dauern wird, bis man in fast allen Bereichen der Beleuchtungsindustrie diese Technologie finden wird. Eine Ausnahme bilden aufwendige Außenaufnahmen „On-Location“, durch die Größe und das Gewicht bzw. der geringen Beleuchtungsstärke der neuartigen Scheinwerfer.²⁹² Speziell in Fernsehstudios passiert aktuell jedoch schon ein Wandel hin zur LED-Technologie und weg von stromintensiven konventionellen Lampensystemen. Die kaufmännischen Vorteile sind einfach zu groß, was sich unter anderem in enormen Einsparungen in der Energiebilanz niederschlägt. Somit kann in Zukunft effizienter gearbeitet und damit die Bilanz der Arbeitsprozesse weiterhin optimiert werden. Somit sind heutige LED-Stufenlinsenscheinwerfer von diesem Typ für ein Fernsehstudio schon vollständig einsetzbar. Es ist zu erwarten, dass konventionelle Scheinwerfer in Zukunft in diesem Bereich vollständig abgelöst werden.

²⁸⁹ Dennis Jackstien (2014): schriftliche Mitteilung vom 14.01.2014

²⁹⁰ Zieseniß et al. 2009, S. 76

²⁹¹ <http://www.stuttgarter-zeitung.de/inhalt.neue-swr-studios-der-moderator-greift-in-die-luft.67fe2cd8-ee15-4a5e-b557-523699086a4d.html> [Stand: 23.12.2013]

²⁹² Dennis Jackstien (2014): schriftliche Mitteilung vom 10.02.2014

5 Schluss

Mit der vorliegenden Arbeit konnte der Nachweis geführt werden, das neuartige LED-Stufenlinsenscheinwerfer im Vergleich zu konventionellen Halogen-Stufenlinsenscheinwerfern:

1. vergleichbaren Farbwiedergabeindexe von $R_a > 90$ besitzen,
2. Energieeinsparungen von $> 50\%$ ermöglichen, dadurch weniger und leichtere Energiezufuhr zulassen,
3. laufende Energiekosteneinsparungen bei täglichem Studioeinsatz von 8 Std. von etwa 230,- €/ Scheinwerfer und Jahr
4. neuartige Scheinwerferansteuerungen in den LED-Stufenlinsenscheinwerfern, als Bussysteme vorhanden sind, die damit komplexe externe Switch und Dimmer entfallen lassen,
5. bereits heute ein vollständiger Ersatz bzw. eine echte Alternative sind,
6. bei Ablöse- oder Neuinvestitionen im Studiolichtbereich erste Wahl sind.

Weiterführende Untersuchungen und Entwicklungen, sollten sich auf folgende Aufgaben konzentrieren:

1. Einbeziehung weiterer LED-Stufenlinsenscheinwerfer anderer renommierter Hersteller, um eine ausreichend gesicherte Widerspiegelung des Studioscheinwerfermarktes zu erreichen.
2. Vergleichende Messungen mit neuartigen Messmethoden zur Bestimmung der Farbwiedergabequalität, wie z.B. CQS vom NIST und TLCI vom Alan Robert, um die hier erzielten Messergebnisse im CIELAB2000 mit R_a zu verifizieren.
3. Einbeziehung der neuen Möglichkeiten von neuartigen Fernsehkameras durch wesentlich lichtempfindlichere Aufnahmesensoren in die lichttechnischen Messungen.
4. Schaffung eines geschlossenen Regelkreises von Lichtmessungen mit Hilfe derameratechnik und anschließender Steuerung der Helligkeit, Farbtemperatur und Farbwiedergabe der Studiobleuchtung,
5. Eine Optimierung der Linearkombinationen bei Kamerasensoren auf die spektrale Verteilung neuartiger Lichtquellen,
6. Die Lebensdauer, Effizienz und Lichtausbeute sollte durch neuartige Kühlverfahren (z.B. Wasserkühlung) für die LED-Stufenlinsenscheinwerfer weiterentwickelt werden,
7. Eine Steigerung der Farbwiedergabe durch dynamisches Angleichen der Blauanteile der LED-Lightengine in einem Scheinwerfer.

Allgemein konnte abschließend festgestellt werden, dass die Farbmessung und Bewertung durch das veraltete CIE-Normvalenzsystem für die heutige Zeit nicht mehr ausreichend ist, da dieses ausschließlich für das menschliche Auge bewertet. Hierbei wird sich die neue Testmethode wie TLCI in Zukunft durchsetzen.

Weiterhin gibt jedoch die hier angewandte und entwickelte Messmethode, über eine Kameraanalyse mit anfänglichen RGB-Weißabgleich und anschließender Auswertung der RGB-Farbe über den Waveformmonitor, hinreichende Aussagen zur Farbwiedergabequalität und ist somit als praxistaugliches Messverfahren für Lichtquellen anzusehen.

Durch die zu beobachtende, breite Entwicklungsleistung der Leuchtmittel- und Scheinwerferhersteller, ist zu erwarten, dass dieser LED-Scheinwerfertyp in höhere Leistungskategorien vordringen wird. Dies wird, der Entwicklung der LED zufolge, jedoch nicht mehr lang auf sich warten lassen. Der Einsatz in Fernsehstudios bzw. bei Außenaufnahmen (On-Location) ist hierbei jedoch die wohl größte Herausforderung dieser Technologie.

Abschließen kann gesagt werden, dass es nach wie vor Stufenlinsenscheinwerfer als Standard-Lichtquellen in der Fernsehindustrie geben wird. Diese werden in Zukunft nur durch die neuartige LED-Lichttechnologie verbessert bzw. ersetzt, verdrängt werden sie aus heutiger Sicht jedoch wahrscheinlich nicht.

Literaturverzeichnis

Interviews (Auszüge in Anlage N)

B. Eng. Markus Buchner (2014):

Ausbildung: Bachelor of Engineering (Medientechnik)

Betätigungsfelder: Medienplanung, Projektingenieur

Dipl. Ing. Dennis Jackstien (2014):

Ausbildung: Dipl. Ing. für Medientechnik

Betätigungsfelder: 7 Jahre in der Entwicklungsabteilung und Produktmanagement ARRI
Lichttechnik beschäftigt/ freiberuflich für ARRI - Workshops, Präsentationen usw. zum Thema Lichttechnik, Lichtgestaltung mit Schwerpunkt LED

Uwe Gebauer (2014):

Ausbildung: Elektromonteur/ ausgebildeter Meister für Veranstaltungstechnik/ Beleuchtung und Bühnenbeleuchtungsmeister

Betätigungsfelder: Fernsehen (Bühnenshow, EB- und Studioproduktion, Beleuchtung)
Planung und Durchführung von Produktion inkl. Material, Personal und Design

Bücher und Veröffentlichungen

Ackermann, Norbert (2006): Lichttechnik. Systeme der Bühnen- und Studiobeleuchtung. 2. Auflage. Wien.

Arnold & Richter Cine Technik GmbH & Co. Betriebs KG (2012): Benutzerhandbuch. L7. Stephanskirchen

Baer, Roland (1996): Beleuchtungstechnik. Grundlagen. 2. Auflage. Berlin

Dietze, Konrad (2013): Auswirkungen der Entwicklung von Organischen Leuchtdioden (OLED) auf die digitale Außenwerbung. Dresden: Hochschule Mittweida. MINI-BA

Geck, Mathias (2011): LED-Licht in Film und Fernsehen: Chancen und Risiken. Mittweida: Hochschule Mittweida. Bachelorarbeit.

Grosch, Thorsten (2009): Grundlagen des Lichts. Photorealistische Computergrafik. 2. Vorlesung. Magdeburg

Hanus, Bo (1996): Solaranlagen. Der Praxis-Ratgeber für Photovoltaik-Anwender. 1. Auflage. Feldkirchen.

Jackstien, Dennis (2006): Spezifizierung eines Kameralichtes für die elektronische Berichterstattung im Fernsehen: Eine Produktidee auf Basis der LED-Technologie der Arnold & Richter Cine Technik GmbH & Co. Betriebs KG. Mittweida: Hochschule Mittweida. Diplomarbeit.

Jackstien, Dennis (2013): ARRI. LED Technologie. Vortrag. München.

Keller, Max (1991): DuMont's Handbuch Bühnenbeleuchtung. 3. Auflage. Köln

Klein, Georg A. (2004): Farbenphysik für industrielle Anwendungen. 1 Auflage. Heidelberg.

Kreckel, Rüdiger (2013): FKTG: Stand und allgemeine Entwicklung der Studiotechnik. 67. Jahrgang – Sonderdruck. Berlin

Loos, Hansl (1989): Farbmessung. Grundlagen der Farbmessung und ihre Anwendungsbereiche in der Druckindustrie. 4. Auflage. Itzehoe, (Naturkundliche Grundlagen der Druckindustrie)

McCamy, C. S.; Marcus, H.; Davidson, J. G. (1976): A Color-Rendition Chart. Journal of Applied Photographic Engineering. 2. Auflage. o.O.

Ris, Hans Rudolf (2003): Beleuchtungstechnik für Praktiker. Grundlagen – Lampen – Leuchten – Planung – Messung. 3. Auflage, Berlin.

Ritter, Marc (2010): Die Veränderung und Entwicklung der Lichttechnik in der Event- und Fernsehbranche. Köln: Hochschule Mittweida. Bachelorarbeit.

Weigand, Frank (2003): Lichtmischung und – sammlung bei LEDs. Lippstadt: Hochschule Mittweida. Diplomarbeit.

Zieseniß, Carl-Heiz; Lindemuth, Frank; Schmits, Paul W. (2009): Beleuchtungstechnik für den Elektrofachmann. Lampen, Leuchten und Ihre Anwendung. 8. Auflage. München/Heidelberg.

Internet

Academy of Motion Picture Arts and Sciences (2011): Solid State Lighting Project. URL: http://www.oscars.org/video/watch/stc_ssl_pp_makeup.html [Stand: 02.02.2014]

Arnold & Richter Cine Technik GmbH & Co. Betriebs KG (2010): Lighting Equipment. URL: http://www.arri.de/lighting/lighting_equipment/ [Stand: 15.02.2014]

Atld.de (2014): Ton, Licht und Messe. URL: http://www.atld.de/product_info.php?products_id=33013&gclid=ClbR3q-8-7sCFUgJwwodQG8AuQ [Stand: 22.12.2013]

B & H Foto & Electronics Corp. (2014): The Professional's Source. URL: <http://www.bhphotovideo.com> [Stand: 15.02.2014]

Baskan, Mithat (o.J.): Filterfolien für Fotografen. URL: <http://www.filterfolie.de/WD-Folien> [Stand: 22.12.2013]

Bax-shop.de (2014): Showtec Performer 2000 LED Fresnel Theaterscheinwerfer 3200K. URL: <http://www.bax-shop.de/showtec-performer-2000-led-fresnel-theaterspot-3200k?gclid=CLn50ZbqtbwCFQzItAodcjsA8w> [Stand: 30.01.2014]

Bernhardt, Thomas; Hornisch, Jörg (o. J.): Begriffe in der Lichtmessung. URL: <http://www.wirsindheller.de/Begriffe-in-der-Lichtmessung.28.0.html> [Stand: 30.01.2014]

Bernstädt, Herbert (2001): Wissenstransfer zum Thema Veranstaltungstechnik mit dem Schwerpunkt Lichttechnik. URL: <http://www.hbernstaedt.de> [Stand: 15.02.2014]

Bönisch, Roland (2011): Die Led-Lampe. URL: <http://www.led-lampe.info> [Stand: 15.02.2014]

Boronkay, Gabor (2012): Colour Conversion Centre 4.0a. URL: <http://ccc.orgfree.com/> [Stand: 22.12.2013]

Braun, Adrienne (2012): Der Moderator greift in die Luft. URL: <http://www.stuttgarter-zeitung.de> [Stand: 15.02.2014]

Cinescopophilia et al. (2013): Stop Measuring LED Lights By CRI and Use TLCI Instead Says EBU. URL: <http://cinescopophilia.com> [Stand: 15.02.2014]

Cree (o.J.): Cree Sets New R&D Performance Record with 276 Lumen-Per-Watt Power LED. URL: <http://www.cree.com> [Stand: 15.02.2014]

Davies, Françoise (2012): TELEVISION LIGHTING CONSISTENCY INDEX 2012. URL: <https://tech.ebu.ch> [Stand: 15.02.2014]

Dehen, Wolfgang; Laier, Dr. Peter; Patzak, Dr. Klaus (2014): OSRAM-LICHT. URL: <http://www.osram.de> [Stand: 15.02.2014]

EasyRGB (2014): Color Calculator. URL: <http://easyrgb.com/index.php?X=CALC> [Stand: 22.12.2013]

Farbe.com (o.J.): Das Normalvalenz- oder CIE System. URL: <http://www.farbe.com/cie01.htm> [Stand: 13.02.2014]

Frame Fresh (2013): Die neue Led-Serie von ARRI inkl. Vergleichschart. URL: http://www.framefresh.com/web_delivery/die_neue_led_serie_von_arri_inkl_vergleichschart.pdf [Stand: 23.12.2013]

Grassvalley (2014): LDK 8300 Live Super SloMo Camera. URL: http://www.grassvalley.com/products/ldk_8300 [Stand: 18.12.2013]

Hartl, Stephan H. (o. J.): CIE-Farbräume. URL: <http://www.copysshop-tips.de/luf06.php> [Stand: 05.01.2014]

Häßler, Ulrike (2014): RGB nach HSV und HSV nach RGB. URL: <http://www.wisotop.de/vonRGBnachHSV.shtml> [Stand: 30.01.2014]

Hauke, Haller (2000): Led-Info das Rechercheportal. URL: <http://www.led-info.de> [Stand: 15.02.2014]

Herz, Thomas (2014): SuperFlux LED Nichia NSPWR70CSS P9 weiß. URL: <http://www.led-shop24.de/superflux-leds/nichia-nspwr70css.htm> [Stand: 10.01.2014]

Heßland, Karina (o.J.): Neues Design für das MDR THÜRINGEN JOURNAL. URL: http://www.mdr.de/thueringen-journal/design118_showImage-3_zc-c4a1d70b.html [Stand: 02.02.2014]

Hessling, Dr.-Ing Matthias (2014): Deutsche Lichttechnische Gesellschaft e.V. URL: http://www.litg.de/publik/images/litg/25/LiTG_Publ.13_Kurzbericht_CRF_WEB.pdf [Stand: 30.01.2014]

Hilberth, Iris (o.J.): Wer erfand die Glühbirne. URL: <http://www.wissen.de/wer-erfand-die-gluehbirne> [Stand: 05.01.2014]

Kohlenberg, Jürgen (2005): Farbwiedergabestufen. URL: <http://www.codeknacker.de/farbwiedergabestufen.htm> [Stand: 06.01.2014]

Kottas, Markus (2013): LEDSHIFT. URL: <http://www.ledshift.com> [Stand: 15.02.2014]

Landgraf, Christian (2013): Nachteile der LED. URL:

http://www.lichtmacherei.de/nachteile_der_led.htm [Stand: 30.01.2014]

Lenz, Björn (2009): Leuchtmittel Ratgeber. URL: <http://www.leuchtmittel-ratgeber.de> [Stand: 15.02.2014]

Lichtprofi (o.J.): o.T. URL: <http://lichtprofi.system-shop.at/sitemap.htm> [Stand: 10.01.2014]

Lindbloom, Justin (2009): Useful Color Calculators and Informations. URL: http://www.brucelindbloom.com/index.html?Eqn_DeltaE_CIE2000.html [Stand: 30.01.2014]

Litepanels (2014): Inca 12 Tungsten Fresnel. URL: <http://store.litepanels.com/p/inca-12-tungsten-fresnel> [Stand: 02.02.2014]

Misholi, Ariel (o.J.): Juddsche Gerade. URL: <http://www.techniklexikon.net/d/juddsche-geraden/juddsche-geraden.htm> [Stand: 06.01.2014]

Moser, Michael; Schneider, Jan Ole (2013): Stundensatz der IT-/Engineering-Freiberufler erreicht neuen Höchstwert. URL: <http://www.gulp.de/kb/st/stdsaetze/sstext.html> [Stand: 22.12.2013]

Nagel, Dr. Jelena; Hennig, Robert; Apel, Thomas; Kilb, Holger (2014): Verbraucherinformation zu Licht emittierenden Dioden. URL: <http://www.baua.de/de/Produktsicherheit/Produktgruppen/Elektrische-Produkte/LED-Roehrenlampen.html> [Stand: 30.01.2014]

Oebbeke, Alfons (2013): LED (light-emitting diode) im Lampen-Magazin. URL: <http://www.baulinks.de> [Stand: 15.02.2014]

Ottmann, Verena (2012): Bildsensoren in Digitalkameras. URL: <http://www.pcwelt.de/ratgeber/CMOS-vs-CCD-Bildsensoren-5794727.html> [Stand: 30.01.2014]

Peters, Matthias (o. J.): Was ist überhaupt ein CCD. URL: <http://www.ccd-sensor.de/html/grundprinzip.html> [Stand: 30.01.2014]

Placke, Dr. P. (o. J.): Leuchtdichtemessung. URL: <http://www.pepla.de/original-texte/leuchtdichtemessung.htm> [Stand: 18.12.2013]

PLUSMUSIC B2B Shop (2014): DTS SCENA LED 150 WHITE 3.000 K FR. URL: http://b2b.plusmusic.ch/epages/Plusmusic.sf/de_CH/?ObjectPath=/Shops/Plusmusic/Product/s/16305264 [Stand: 02.02.2014]

Primrose, Jon (1987): Polaris. URL: <http://www.strandarchive.co.uk> [Stand: 15.02.2014]

Profot (2014): Lupolux Dayled LED Fresnelspot 1000. URL: http://www.profotshop.de/index.php?category_id=249&page=shop.product_details&product_id=2672&Itemid=70&option=com_virtuemart&vmcchk=1&Itemid=70 [Stand: 02.02.2014]

Redeker, Heinz-Gerhard (o. J.): Vom Licht zur Beleuchtung Teil 2 - Licht und Farbe. URL: <http://www.elv.de> [Stand: 15.02.2014]

Roberts, Alan (2013): Practical Spectroradiometry. URL: <http://www.gtc.org.uk> [Stand: 15.02.2014]

Schenke, G. (2013): Lampen. URL: <http://www.et-inf.fho-emden.de> [Stand: 15.02.2014]

Schmid-Gaiser, Stefan (2010): Farbwiedergabe. URL: <http://www.elektrowissen.de/Elektronik/farbwiedergabe.html> [Stand: 06.01.2014]

Schmidt, F.; Krüger, U. (o.J.): Eigenschaften von digitalen 1-Chip-CCD-Kameras bei der Anwendung zur Farbbeurteilung und Farbdarstellung. URL: <http://www.technoteam.de> [Stand: 15.02.2014]

Schrom, Christian (2014): o. T. URL: <http://www.machhell.de/index.php?cat=21&product=4050300296692&sidDE5307DD1FA443FEA85C24ECC973B26A=76c0lqu2eh571k9if6glqmt6l0> [Stand: 22.12.2013]

Schwandt, Dr. Friedrich; Kröger, Tim (2014): Industriestrompreise in Deutschland in den Jahren 2000 bis 2013 (in Euro-Cent pro Kilowattstunde). URL: <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/155964/umfrage/entwicklung-der-industriestrompreise-in-deutschland-seit-1995/> [Stand: 22.12.2013]

Slezak, Stefan (2010): Vor- und Nachteile der LED Technik. URL: <http://www.lampenladen24.de/blog/led-die-zukunft-des-s/vor-und-nachteile-der-led-technik.html> [Stand: 02.02.2014]

Stefan (2004): Was sind LUMILEDS. URL: <http://www.ledstyles.de/ftopic149.html> [Stand: 10.01.2014]

Stenzel, Peter (o.J.): Argumente für die Glühbirne - Informationen über Glühbirnen, Halogen, Led & Sparlampen. URL: <http://www.gluehbirne.ist.org> [Stand: 15.02.2014]

Thomas Wildgruber (2013): Farbmodelle-LAB. URL: http://www.prontosystems.org/_media/presstec/colormanagement/farbmodelle/lab.jpg [Stand: 07.01.2014]

Tradekorea (o.J.): o.T. URL:
http://web.tradekorea.com/upload_file2/sell/28/S00027228/30W_HB_COB_LED__Al_Oxide_.jpg [Stand: 30.01.2014]

Waldorf, Dr. Jürgen (o.J.): LEDs erobern die Beleuchtung. URL: <http://www.licht.de> [Stand: 15.02.2014]

Weigert, Dedo (2012): LED: Lichtquelle der Zukunft – auch für kreative Aufgaben. URL: http://www.film-tv-video.de/225.html?&tx_ttnews%5Btt_news%5D=42873&L=0&no_cache=1 [Stand: 15.02.2014]

Wikipedia (o.J.): Die freie Enzyklopädie. URL: <http://de.wikipedia.org> [Stand: 15.02.2014]

Wintermayr, Peter (2013): Entwicklung LED. URL:
<http://www.elektroniknet.de/typo3temp/pics/3db6b06f5a.jpg> [Stand: 30.01.2014]

Yoshi, Ohno; Wendy, Davis (2010): CQS - Colour Quality Scale. URL:
<http://www.armadilloled.com/CQS-Colour-Quality-Scale.htm> [Stand: 22.12.2013]

Zeit, Thomas (2014): Toneart mediavision. URL: <http://www.toneart-shop.de/arri-l7-c-stand-mount-blue-silver-3m-cable-schuko-connector-l1-31330cd.html?gclid=CL6OteahtrwCFSgewwodqDoAAg> [Stand: 02.02.2014]

Zimmer, Dr. Hans Heinz (2013): VDE Website Impressum. URL:
<http://www.vde.com/de/Verband/Kontakt/Impressum-Technik/Seiten/Impressum-Haftung.aspx> [Stand: 10.01.2014]

Anlagenverzeichnis

A: Allgemeine Berechnung für Ra.....	XXIV
B: Lichttechnische Größen und Einheiten	XXIV
C: Vergleich der wesentlichsten Leuchtmittel für ein Fernsehstudio.....	XXVII
D: Kennzeichnung von Leuchtmitteln nach DIN 49805.....	XXVIII
E: Lichtquellen und Scheinwerfertypen.....	XXVIII
F: Materialsysteme der LEDs verschiedener Farben.....	XXX
G: Geschichte der LED-Lichttechnologie.....	XXX
H: Grundlagen Kamerasensoren.....	XXXIII
I: Parameter weiterer konventioneller Scheinwerfer.....	XXXIV
J: Parameter weiterer LED Scheinwerfer.....	XXXVI
K: Zur Methodik: Rechnungsweg mit Formeln.....	XXXVII
L: Ergebnisse des Studioversuchs.....	XLII
M: Ergänzende Abbildungen zur Auswertung.....	LIV
N: Auszüge aus den Interviews.....	LVI
O: CD-ROM mit Messergebnissen und Berechnungstabelle.....	LXIII

Anlagen

A. Allgemeine Berechnung für Ra

„Zur Berechnung des Farbwiedergabeindex sind 14 Testfarben durch DIN 6169 genormten Remissionsverlauf definiert. Die Abweichung der Sekundärspektren zwischen Referenz- und Testspektrum dient als Maßzahl für die 14 speziellen Farbwiedergabeindizes. Zur Berechnung des allgemeinen Farbwiedergabeindex Ra werden allerdings nur die ersten acht Testfarben herangezogen. Dabei kann der Farbwiedergabeindex Ri zur Farbe i ermittelt werden.“²⁹³ Ein zusammenfassender Wert ist der allgemeine Farbwiedergabeindex Ra, der als arithmetischer Mittelwert den Durchschnitt aus den Farbwiedergabeindizes R1 bis R8 bildet (Abb. 52). Er wird meist mit CRI gleichgesetzt.

$$R_a = \frac{1}{8} \cdot \sum_{i=1}^8 R_i$$

Abbildung 52: Allgemeine Berechnungsformel für Ra.²⁹⁴

B. Lichttechnische Größen und Einheiten

▪ Leuchtdichte L

Die Leuchtdichte (cd/m^2) ist das Maß für den Helligkeitseindruck einer beleuchteten Fläche im menschlichen Auge²⁹⁵ und liefert detaillierte Information über die Orts- und Richtungsabhängigkeit des von einer Lichtquelle abgegebenen Lichtstromes.

$$L_v = \frac{\partial^2 \Phi_v}{\partial \Omega \cdot \partial A_1 \cdot \cos \varepsilon_1}$$

Abbildung 53: Formel zur Berechnung der Lichtdichte.²⁹⁶

▪ Lichtausbeute η

Die Lichtausbeute (lm/W), ein Maß für die Effizienz einer Lichtquelle, gibt an, mit welchem Wirkungsgrad die elektrische Leistung in Licht umgesetzt wird und ist somit der Quotient aus Lichtstrom und elektrischer Leistung.²⁹⁷

²⁹³ <http://de.wikipedia.org/wiki/Farbwiedergabeindex> [Stand: 30.01.2014]

²⁹⁴ http://www.elv.de/Vom-Licht-zur-Beleuchtung-Teil-2-Licht-und-Farbe/x.aspx/cid_726/detail_36948/print_1
[Stand: 30.01.2014]

²⁹⁵ Vgl. Zieseniß et al. 2009, S. 22

²⁹⁶ <http://de.wikipedia.org/wiki/Leuchtdichte> [Stand: 30.01.2014]

$$\eta = \frac{\Phi_v}{P}$$

Abbildung 54: Formel zur Berechnung der Lichtausbeute.²⁹⁸

- Lichtmenge Q

Die Lichtmenge (lm s) entspricht der Lichtarbeit²⁹⁹ und wird als Integral des Lichtstromes in einer bestimmten Zeit T berechnet.³⁰⁰

$$Q_v = \int_0^T \Phi_v(t) dt$$

Abbildung 55: Formel zur Berechnung der Lichtmenge.³⁰¹

- Kontrastwiedergabefaktor CRF

Der Kontrastwiedergabefaktor ist ein Maß für die Wahrnehmbarkeit eines Sehobjekts (Kontrast zwischen Leuchtdichte eines Gegenstands und Umgebungsleuchtdichte) und ist von der örtlichen Beleuchtungssituation abhängig.³⁰²

$$C_2 = (L_2 - L_1)/L_1$$

Abbildung 56: Formel zur Berechnung des Kontrastwiedergabefaktors.³⁰³

- Lichtstärkeverteilungskurve LVK

Die Lichtstärkeverteilungskurve gibt an, wie viel Licht von einer Lampe in einem bestimmten Winkel ausgesendet wird. Somit wird gezeigt, aus welcher Richtung und mit welcher Lichtstärke ein Lichtstrom einer Lichtquelle kommt, dabei sind 0° immer senkrecht unter der Lampe.³⁰⁴

²⁹⁷ Vgl. Zieseniß et al. 2009, S. 20

²⁹⁸ <http://de.wikipedia.org/wiki/Lichtausbeute> [Stand: 30.01.2014]

²⁹⁹ Vgl. Ris 2003, S. 21

³⁰⁰ Vgl. <http://de.wikipedia.org/wiki/Lichtmenge> [Stand: 30.01.2014]

³⁰¹ Ebd.

³⁰² Vgl. Ris 2003, S. 33

³⁰³ http://www.litg.de/publik/images/litg/25/LiTG_Publ.13_Kurzbericht_CRF_WEB.pdf [Stand: 30.01.2014]

³⁰⁴ Vgl. <http://www.wirsindheller.de/Begriffe-in-der-Lichtmessung.28.0.html> [Stand: 30.01.2014]

- Wirkungsgrad

Der Wirkungsgrad bzw. Leuchtenwirkungsgrad gibt an, in welchem Verhältnis das von der Lampe abgegebene Nutzlichte zum vom Leuchtmittel nach allen Seiten hin ausgestrahlten Licht steht.³⁰⁵

- Elektrische Stromstärke I

Die Stromstärke gibt an, wie viel elektrische Ladung bezogen auf die dazu benötigte Zeitspanne einen definierten Querschnitt passiert.

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \int_A \vec{J} \cdot d\vec{A}$$

Abbildung 57: Formel zur Berechnung der elektrischen Stromstärke.³⁰⁶

- Elektrische Spannung U

Die elektrische Spannung ist eine physikalische Größe, die angibt, wie viel Energie nötig wird, um eine elektrische Ladung innerhalb eines elektrischen Feldes zu bewegen.

$$U_{AB} = \frac{W_{AB}}{Q} = \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{s}.$$

Abbildung 58: Formel zur Berechnung der elektrischen Spannung.³⁰⁷

- Elektrische Leistung P

Die physikalische Größe Leistung steht für Energie pro Zeit und wird dann als elektrische Leistung bezeichnet, wenn die bezogene oder gelieferte Energie eine elektrische Energie ist.

$$P = U \cdot I$$

Abbildung 59: Formel zur Berechnung der elektrischen Leistung.³⁰⁸

³⁰⁵ Ackermann 2006, S. 17

³⁰⁶ <http://de.wikipedia.org/wiki/Stromst%C3%A4rke> [Stand: 30.01.2014]

³⁰⁷ http://de.wikipedia.org/wiki/Elektrische_Spannung [Stand: 30.01.2014]

³⁰⁸ http://de.wikipedia.org/wiki/Elektrische_Leistung [Stand: 30.01.2014]

C. Vergleich der wesentlichsten Leuchtmittel für ein Fernsehstudio

Abschließend sind die wesentlichen Eigenschaften der bedeutendsten Leuchtmittel für ein Fernsehstudio in Tab. 27 zusammengestellt:

Leuchtmittel -art Parameter	Halogen-Metall dampf- lampe	Weiß LED	Halogen glühlampe
Leuchtdichte	70-117 lm/W	4-105 lm/W	15-36 lm/W
Farbtemperatur	5400 - 8500 K	2700 – 6500 K	2900 - 3400 K
Lebensdauer	200 - 9000 h bei Ausfall	50.000 h bei 50 % Leuchtkraft	20 - 2000 h bei Ausfall
Farbwiedergabe	CRI/Ra 70 - 96	CRI/Ra 65-93	CRI/Ra 100 Kontinuumstrahler
Leistungsbereich	35 – 18.000 W	0,01 – 5 W	2 – 12.000 W
Dimmbarkeit	60 – 100 %	0 – 100 % Konstante Farbtempe- ratur	0 -100 % Starke Verschiebung der Farbtemperatur
Heißzündbarkeit	ca. 5 min	sofort	sofort
Einbrennzeit	3 – 8 min	sofort	sofort
UV-Stahlung	benötigt meist UV-Filter	Keine UV- oder IR- Strahlung	UV- oder IR- Strahlung
Oberflächen- temperatur	Hoher Abwärmeanteil, Klimaanlage	Kaum Oberflächen- temperatur	Hoher Abwärmeanteil, Klimaanlage
Brandgefahr	Latente Brandgefahr	„Kaltes“ Licht	
Umgebungs- temperatur- empfindlichkeit	Umgebungstemperatur unempfindlich	Empfindlich bei Hoher Umgebungstempera- tur	Umgebungstempera- tur unempfindlich
Ausschaltverhalten	Nachglimmen	Sofort Black	Nachglimmen
Farbschatten	Nie Farbschatten	RGB mit Farbschatten	Nie Farbschatten
Leistungsmerkmale	Teilweise hoher Ener- gieaufwand notwendig	Energiesparen	Teilweise hoher Ener- gieaufwand notwen- dig
Gegenwärtige Inves- titionsmerkmale	Geringe Anschaffungs- kosten, aber folgende Servicekosten	z.Zt. noch Hohe An- schaffungskosten	Geringe Anschaf- fungskosten, aber folgende Servicekos- ten

Tabelle 27: Wesentliche Eigenschaften der bedeutendsten Leuchtmittel für Fernsehstudios.³⁰⁹

³⁰⁹ Vgl. <http://www.hbernstaedt.de/> [Stand: 30.01.2014]

D. Kennzeichnung von Leuchtmitteln nach DIN 49805

Die Grundstruktur des ILCOS DIN 49805 sieht wie folgt aus:³¹⁰

Der erste Buchstabe gibt die Lampenkategorie an.

I Glühlampen ... H Halogenlampen ... F Leuchtstofflampen

Weitere Buchstaben definieren die Formen, Anwendungen, Sockel usw., hier nur beispielhaft:

A Hauptreihennorm, größere Lampen ... B kleinere Lampen, Kerze ... G Kugel, allgemeine Beleuchtung ... D stabförmig, zweiseitiger Sockel ... IR Infrarotstrahler

Bei Glühlampen werden zusätzlich Parameter wie Kolben und Farbe angegeben:

/C klar ... /F mattiert oder beschichtet ... /W weiß ... /R rot ... /Y gelb

Beispiele: IA Standard-Glühlampe
 HR Halogen-Glühlampe mit Kaltlichtreflektor
 FD Leuchtstofflampe, zweiseitig gesockelt

Weiterhin muss der Lampensockel eines Leuchtmittels in Verbindung mit der zugehörigen Fassung der Lichtquelle:

- eine gute Halterung und Zentrierung der Lampe ermöglichen,
- eine gute elektrische Verbindung gewährleisten,
- Schutz gegen elektrischen Schlag bei zufälliger Berührung bieten,
- eine leichte Montage und Demontage der Lampe ermöglichen.

Es gibt auch hierbei verschiedenste und genormte Sockelsysteme, hier wieder nur beispielhaft:

E Edison-Sockel meist für Glühlampen und Kompakt-Leuchtstofflampen
B Bajonett-Sockel für Klein- und Zwecklampen
F Stift-Sockel für Halogen-Glühlampen
G Stift-Sockel meist für Leuchtstofflampen

E. Lichtquellen und Scheinwerfertypen

- Fluter, Rampenleuchte und Horizontleuchten

Fluter sind eine Art Lichtquelle, die oft zur gleichmäßigen Ausleuchtung beispielsweise einer Bühne verwendet werden. Wenn man diese Lichtquelle in Gruppen zu je vier Stück zusammenfasst, nennt man Sie Rampenleuchten.

Eine Horizontleuchte ist ein Fluter mit einem asymmetrischen Reflektor. Diese richten das austretende Licht direkt auf entsprechende Projektionswände und kommen oft zur Beleuchtung des hinteren Bühnenbildes zum Einsatz.³¹¹

- Zoom-Profilscheinwerfer

³¹⁰ Vgl. http://www.et-inf.fho-emden.de/~elmalab/beleucht/download/BlT_3.pdf [Stand: 30.01.2014]

³¹¹ Vgl. Ackermann 2006, S. 79

Bei dieser Lichtquelle wird das Licht durch eine aufwendige Lichtkonstruktion mit mehreren Linsen gesammelt und gerichtet. Weiterhin besitzen Profilscheinwerfer verschiedene Einstellmöglichkeiten, wie Farbwechsler, Handdimmer, Drehzapfen, Irisblende und einem Blackout. Durch das Verschieben der Linsen im Inneren der Lichtquelle ergeben sich weitere Einstellungen, wie zum Beispiel die Variation des Lichtkegels und die Schärfe des Lichtkegels. Häufige Anwendung finden diese Lichtquellen in der speziellen Objektbeleuchtung.³¹²

- Verfolger

Verfolger werden ausschließlich zur Personen- und Objektverfolgung eingesetzt. Die Funktionsweise und Ausstattung ist vergleichbar mit dem o.g. Profilscheinwerfer. Zusätzlich werden speziell bei Verfolgern zur optimalen manuellen Führung, Griffelemente und ein Schwerpunktausgleich integriert. Dieser Scheinwerfertyp wird im Open Air Bereich mit Tageslicht emittierenden Leuchtmitteln (z.B. HMI) ausgestattet, um weite Entfernungen überbrücken zu können. Hierfür werden spezielle Vorschaltgeräte benötigt, die meist einen höheren Anschaffungspreis mit sich ziehen.³¹³ In Fernsehstudios werden vornehmlich konventionelle Halogenleuchtmittel eingesetzt.

- Spiegelabgelenkte Scheinwerfer (Scanner)

Ein sog. Scanner wird als Multifunktionsscheinwerfer eingesetzt und funktioniert im Inneren ähnlich wie ein Profilscheinwerfer, wobei das austretende Licht von einem beweglichen Spiegel reflektiert wird. Durch diese Reflexion geht Lichtstärke verloren, somit werden meist lichtstarke Halogen-Metalldampfleuchtmittel (siehe 2.2.1) eingesetzt. Da diese Lichtquellen aus der Diskothekenbeleuchtung stammen, haben sie extrem viele Einstellmöglichkeiten und werden z.Zt. nur noch sehr selten als Effektlicht oder kleiner Verfolger verwendet.³¹⁴

- Kopfbewegte Scheinwerfer (Moving Head)

Diese Art von Lichtquellen gehört ebenfalls zu den Multifunktionsscheinwerfern und wird in zwei Gruppen geteilt, dem „Washlight“ und dem „Spotlight“. Diese Systeme bestehen aus einem Basisgehäuse, einem Bügel (Yoke) und dem Kopf (Head) indem das Leuchtmittel sitzt. Ein sog. „Washer“ entspricht am ehesten dem Lichtcharakter von einem Fluter und enthält häufig ein stufenloses Farbmischsystem.

Der „Spotlight Moving Head“ ähnelt im Lichtcharakter dem Profilscheinwerfer und hat eine ähnliche Ausstattung wie der o.g. „Washer“, jedoch mit zusätzlich rotierenden Projektionsbildern (Gobos). Diese Lichtquellen werden häufig als Effektlicht oder Ersatz für konventionelle Scheinwerfer eingesetzt.³¹⁵

³¹² Vgl. Ackermann 2006, S. 82

³¹³ Vgl. Ackermann 2006, S. 82

³¹⁴ Vgl. Ackermann 2006, S. 85

³¹⁵ Vgl. Ackermann 2006, S. 86

F. Materialsysteme der LEDs verschiedener Farben

Farbe	Wellenlänge λ in nm	Werkstoff
Infrarot	$\lambda > 760$	Galliumarsenid (GaAs) Aluminiumgalliumarsenid (AlGaAs)
Rot	$610 < \lambda < 760$	Aluminiumgalliumarsenid (AlGaAs) Galliumarsenidphosphid (GaAsP) Aluminiumgalliumindiumphosphid (AlGaInP) Galliumphosphid (GaP)
Orange	$590 < \lambda < 610$	Galliumarsenidphosphid (GaAsP) Aluminiumgalliumindiumphosphid (AlGaInP) Galliumphosphid (GaP)
Gelb	$570 < \lambda < 590$	Galliumarsenidphosphid (GaAsP) Aluminiumgalliumindiumphosphid (AlGaInP) Galliumphosphid (GaP)
Grün	$500 < \lambda < 570$	Indiumgalliumnitrid (InGaN) / Galliumnitrid (GaN) Galliumphosphid (GaP) Aluminiumgalliumindiumphosphid (AlGaInP) Aluminiumgalliumphosphid (AlGaP) Zinkoxid (ZnO), in Entwicklung
Blau	$450 < \lambda < 500$	Zinkselenid (ZnSe) Indiumgalliumnitrid (InGaN) Siliziumkarbid (SiC) Silizium (Si) als Träger, in Entwicklung Zinkoxid (ZnO), in Entwicklung
Violett	$400 < \lambda < 450$	Indiumgalliumnitrid (InGaN)
Ultraviolett	$230 < \lambda < 400$	Diamant (C) Aluminiumnitrid (AlN) Aluminiumgalliumnitrid (AlGaIn) Aluminiumgalliumindiumnitrid (AlGaInN)

Tabelle 28: Materialsysteme der LEDs verschiedener Farben.³¹⁶

G. Geschichte der LED-Lichttechnologie

Wie bereits in Kapitel 3 erwähnt, hat der Engländer Henry Joseph Round im Jahre 1907 den Grundstein für die Entwicklung von Leuchtdioden gelegt. Er hat in seinen Experimenten mit SiC (Siliziumkarbid oder Karborund) die sog. "Elektrolumineszenz" beobachten können.³¹⁷ Dabei werden anorganische Stoffe unter einer elektrischen Spannung zum Leuchten angeregt.³¹⁸ Fortan stockte 50 Jahre die Entwicklung dieser Technologie, bis der russische Physiker Oleg Vladimirovich Losev diese Lichtemission bis 1942 erneut untersuchte.³¹⁹ 1935

³¹⁶ <http://de.wikipedia.org/wiki/Leuchtdiode#Geschichte> [Stand: 30.01.2014]

³¹⁷ Vgl. <http://www.baulinks.de/licht/webplugin/2008/0586-led.php4> [Stand: 30.01.2014]

³¹⁸ Vgl. <http://www.licht.de/de/info-und-service/licht-specials/led-das-licht-der-zukunft/die-lichtquelle-led/geschichte-der-led/> [Stand: 30.01.2014]

³¹⁹ Ebd.

wurde von G. Destriau an Zinksulfid (ZnS) ein ähnlicher Leuchteffekt entdeckt und von ihm zu Ehren des russischen Physikers Losev als „Lossew-Licht“ bezeichnet.³²⁰

Es dauerte lange bis man diese Lichtemission zufriedenstellend erklären konnte. Erst 1951 mit dem technischen Fortschritt der Halbleiterphysik und der Entwicklung des Transistors konnte man die o.g. Beobachtungen in das theoretische Schema des Festkörperwissens einordnen und erklären. Ab sofort experimentierten Wissenschaftler weiterhin ausgiebig mit Zinksulfid. Ab 1959 stand die Lichterzeugung durch Halbleitermaterial im Vordergrund. Hierbei spielten die „sichtbare Lichtemissionen auf Basis eines direkten Mischkristalls von Galliumarsenid (GaAs) und Galliumphosphid (GaP) eine besondere Rolle.“³²¹ Weiterhin wurde durch diese neuartige Technologie versucht, die alten Kathodenstrahlröhren durch flachere Bildschirme zu ersetzen.³²² Somit kam mehr als 50 Jahre nach den ersten Entdeckungen von H. J. Round die LED Entwicklung erst voll in Gange. Es folgte rasch die Entwicklung der ersten roten Lumineszenzdiode (Typ GaAsP) und markiert die Geburtsstunde der industriell gefertigten LEDs.³²³ Somit wurde die Leuchtdiode ähnlich wie wir Sie heute kennen von Nick Holonyak im Jahre 1962 ins Leben gerufen.³²⁴ „Grob gesagt konnte danach jedes Jahrzehnt die Effektivität um das Zehnfache erhöht werden.“³²⁵

Dank verbesserter Halbleitermaterialien geht die Entwicklung der LED stetig weiter. Ab 1971 gibt es LEDs in den Farben Grün, Orange, Gelb und somit verbesserten sich Leistung und Effizienz.³²⁶ Weitere verschiedene Farbtöne von Grün bis Ultraviolett wurden mit dem neuen Halbleitermaterial Galliumnitrid (GaN) möglich. Auf dieser Grundlage entwickelte Shuji Nakamura 1993 in Japan die ersten kommerziellen blauen LED auf GaN-Basis.³²⁷ Weiterhin war die Entwicklung sehr effizienter Grün-Indium-Galliumnitrid-Leuchtdiode (InGaN-LED) und später auch eine weiße LED sein Verdienst.³²⁸

Im Jahr 1995 „wird eine LED vorgestellt, die durch Zugabe von Leuchtstoffen weißes Licht aus Lumineszenzkonversion gewinnt. Zwei Jahre später kommen diese weißen LEDs auf den Markt.“³²⁹ Weitere Leistungssteigerungen wurden von Hewlett Packard im selben Zeitraum durch das Ersetzen des auf die lichtemittierenden Pn-Schichten aufgetragenen GaAs-

³²⁰ <http://www.led-info.de/grundlagen/leuchtdioden/geschichte.html> [Stand: 30.01.2014]

³²¹ <http://www.licht.de/de/info-und-service/licht-specials/led-das-licht-der-zukunft/die-lichtquelle-led/geschichte-der-led/> [Stand: 30.01.2014]

³²² Vgl. <http://www.led-info.de/grundlagen/leuchtdioden/geschichte.html> [Stand: 30.01.2014]

³²³ <http://www.licht.de/de/info-und-service/licht-specials/led-das-licht-der-zukunft/die-lichtquelle-led/geschichte-der-led/> [Stand: 30.01.2014]

³²⁴ Vgl. <http://de.wikipedia.org/wiki/Leuchtdiode#Geschichte> [Stand: 30.01.2014]

³²⁵ <http://www.led-info.de/grundlagen/leuchtdioden/geschichte.html> [Stand: 30.01.2014]

³²⁶ <http://www.licht.de/de/info-und-service/licht-specials/led-das-licht-der-zukunft/die-lichtquelle-led/geschichte-der-led/> [Stand: 30.01.2014]

³²⁷ <http://de.wikipedia.org/wiki/Leuchtdiode#Geschichte> [Stand: 30.01.2014]

³²⁸ <http://www.licht.de/de/info-und-service/licht-specials/led-das-licht-der-zukunft/die-lichtquelle-led/geschichte-der-led/> [Stand: 30.01.2014]

³²⁹ Ebd.

Substrates durch ein transparentes GaP-Substrat erreicht. Diese „Transparent Substrat Dioden“ (TS-AlInGaP) waren mit ca. 40 lm/W zur Jahrtausendwende die effektivsten verfügbaren Leuchtdioden.³³⁰

Ab diesem Zeitraum wurden LEDs stetig in Effizienz und Lichtausbeute weiter entwickelt. So erreichten im Jahre 2006 „erste LEDs eine Lichtausbeute von 100 lm/W, somit wird ihre Effizienz zu diesem Zeitpunkt nur noch von Gasentladungslampen übertroffen.“³³¹ Seit 2009 wurde von der Firma Nichia eine LED entwickelt, die eine angegebene Lichtausbeute von 160 lm/W besitzt.³³² Das Unternehmen Cree berichtete im Februar 2010 über eine Labor-Prototyp-LED, die bei einer Farbtemperatur von 4579 K und Raumtemperatur circa 208 lm/W erreichte.³³³ Im Oktober 2011 konnte Osram Prototypen einer roten LED vorstellen, die bei 609 nm und Nennstrom von 350 mA eine Lichtausbeute von 168 lm/W erreicht.³³⁴ Weiterhin stellte das Unternehmen Cree ende Dezember 2012 eine LED mit 200 lm/W vor.³³⁵ Wie bereits erwähnt ist die neuste Entwicklung eine weiße R&D Power LED mit 276 Lumen pro Watt an 350 mA und einer Farbtemperatur von 4401 K (unter Vorbehalt).

Diese Entwicklung geht stetig voran und dringt in immer höhere Leistungsregionen vor. Jedoch beziehen sich die o.g. Werte zunächst nur auf die LED allein und nicht auf die Gesamtleistung. Somit besitzen „kommerziell erhältliche weiße LEDs derzeit (Stand Januar 2014) (unter Berücksichtigung der Gesamtleistung) eine Lichtausbeute von meist 50 bis 110 lm/W. LEDs mit wesentlich höheren Werten bei Nennleistung sind nur mit Farbtemperaturen oberhalb von 3500K und/oder Farbwiedergabeindex unterhalb von $R_a = 85$ verfügbar.“³³⁶

Als aktueller Trend gilt die Technologie der Quantum-Dot-LED (QLED oder QDLED). „Hierbei handelt es sich jedoch nicht um LEDs, sondern um die Lumineszenzschicht die über der LED (dem Halbleiterkristall) liegt und eine gravierende Rolle für die Farbtemperatur, Farbwiedergabe und auch der Lumen/Watt Effizienz spielt.“³³⁷

Weiterhin wird „Gegenwärtig besonders an transparente Träger- und Halbleiter-Materialien als auch transparente elektrische Zuleitungen gearbeitet. Da die Bonddrähte (elektrische Leitungen zum Halbleiterchip) einen Teil der leuchtenden Fläche abdecken.“³³⁸

³³⁰ Vgl. <http://www.led-info.de/grundlagen/leuchtdioden/geschichte.html> [Stand: 30.01.2014]

³³¹ <http://www.licht.de/de/info-und-service/licht-specials/led-das-licht-der-zukunft/die-lichtquelle-led/geschichte-der-led/> [Stand: 30.01.2014]

³³² Vgl. <http://de.wikipedia.org/wiki/Leuchtdiode#Geschichte> [Stand: 30.01.2014]

³³³ Vgl. Ebd.

³³⁴ Ebd.

³³⁵ Vgl. <http://www.cree.com/led-components-and-modules/products/xlamp/arrays-directional/~media/Files/Cree/LED%20Components%20and%20Modules/XLamp/Data%20and%20Binning/XLampMKR.pdf> [Stand: 30.01.2014]

³³⁶ <http://de.wikipedia.org/wiki/Leuchtdiode#Geschichte> [Stand: 30.01.2014]

³³⁷ http://www.ledshift.com/News/artikel/QLEDs_Lichterzeugung_mit_Quantum_Dots.html [Stand: 30.01.2014]

³³⁸ <http://de.wikipedia.org/wiki/Leuchtdiode#Geschichte> [Stand: 30.01.2014]

Aktuelle Trends sind in der Beleuchtung, die Kombination von LEDs mit einem „intelligenten Lichtmanagement“, welches durch dynamische Steuerung der Beleuchtung eine Anpassung des Lichts auf den Biorhythmus (Tageslicht) und die Anwesenheit des Menschen, realisiert.³³⁹

H. Grundlagen Kamerasensoren

- Signaltrennung vor dem Kamerasensor

Optische Signaltrennung	Örtliche Signaltrennung	Zeitliche Trennung
Das Spektrum wird durch optische Maßnahmen so aufgeteilt, daß verschiedene Empfänger das Signal gleichzeitig erfassen können. - Strahlteilerwürfel mit dichroitischen Spiegelflächen - Prisma - Gitter	Verschieden angepaßte Empfänger werden nebeneinander angeordnet, sodass die Signalerfassung nur angenähert an einem Ort stattfindet. - 1-Chip-CCD-Matrizen (Bayer-Matrix) - Dreibereichssensoren - Applikationsspezifische Sensoren	Die Daten für die einzelnen Sensoren werden zeitlich nacheinander erfaßt. - Filterrad - LC verstimmbare Filter - Elektrisch veränderbare Sensorempfindlichkeiten - Bewegte Gitter, Prismen, Spiegel

Tabelle 29: Einteilung der Verfahren für Kamerasensoren.³⁴⁰

- CCD-Kamerasensoren

„CCD ist die Abkürzung für Charge Coupled Device. Auf Deutsch heisst das soviel wie: ladungsgekoppeltes Bauelement. CCD-Sensoren bestehen aus einem ein- oder zweidimensionalen Array von Speicherelementen. Verwendung finden sie hauptsächlich als Bildsensor bei Videokameras, Scannern und digitalen Fotoapparaten.

Das Funktionsprinzip gliedert sich in die folgenden Punkte:

Ladungsentstehung in einer CCD Sensorzelle

Spektrale Empfindlichkeit von CCDs

Ladungstransport im CCD

Ladungsverstärkung³⁴¹

- CMOS-Kamerasensoren

„CMOS-Sensoren arbeiten wie CCDs mit Farbfiltern. Allerdings lassen sich die Fotodioden einzeln adressieren und auslesen, da sie ein vertikales und ein horizontales Ausleseregister

³³⁹ Vgl. <http://www.licht.de/de/info-und-service/licht-specials/led-das-licht-der-zukunft/leds-erobern-die-beleuchtung/> [Stand: 30.01.2014]

³⁴⁰ Vgl. <http://calc.arri.de/calculator> [Stand: 30.01.2014]

³⁴¹ <http://www.ccd-sensor.de/html/grundprinzip.html> [Stand: 30.01.2014]

besitzen. Wie bei einem CCD-Sensor ist zu jeder Fotodiode ein Kondensator parallel geschaltet, der die elektrische Ladung speichert. Ein Transistor wandelt die Ladung in Spannung um und stellt diese Spannung dem Signalprozessor zur Verfügung.

CMOS-Bildsensoren sind günstiger in der Fertigung und verbrauchen weniger Strom als CCD-Sensoren. Auch kann ein CMOS-Sensor gleich als Analog-Digital-Wandler fungieren und Kameraeinstellungen wie den Weißabgleich kontrollieren.³⁴²

I. Parameter weiterer konventioneller Scheinwerfer

Folgend die Tab. 30 mit den wichtigsten technischen Daten des ARRI True Blue T1:

Parameter	Beschreibung
Lampenkopf:	Fresnel, 1000 W
Lampentyp:	230 V: 1000 W (FKJ), 650 W (FKH); 120 V: 1000 W (EGT), 750 W (EGR), 500 W (EGN)
Stromverbrauch:	1000 W / 750 W / 650 W / 500 W
Spannungsbereich:	230 V / 120 V
Dimmbarkeit:	Ja, 0 - 100 % per externem Dimmer
Kabel Optionen:	Schuko-Stecker
Farbtemperatur:	3200 K
Abstrahlungswinkel:	10 - 54°
Gewicht:	6,0 Kg
Größe (HxBxT):	357 x 323 x 216 mm

Tabelle 30: Technische Daten des ARRI True Blue T1.³⁴³

Die photometrischen Daten eines ARRI True Blue T1 mit einem „CP71 1000 W / 230 V“ Brenner fasst Tab. 31 zusammen:

Parameter	Abstand 3m in FST:	Abstand 3m in SST:
Lichttech. Größen:	2428 lx, 25357cd, 14927lm	15816 lx, 69819cd, 2403lm
Abstrahlwinkel	50°	9.6°
Durchmesser	2.8 m	0.5 m

Tabelle 31: Photometrischen Daten des ARRI True Blue T1.³⁴⁴

Im Teststudio der HSMW waren überwiegend etwas ältere Stufenlinsen des Typs Quartzcolor Polaris verbaut, deshalb dienten diese ebenfalls als Vergleichs-Scheinwerfer.

³⁴² <http://www.pcwelt.de/ratgeber/CMOS-vs-CCD-Bildsensoren-5794727.html> [Stand: 30.01.2014]

³⁴³ Vgl. http://www.arri.de/cn/lighting/lighting_equipment/lampheads/tungsten_lampheads/true_blue_t/-true_blue_t1/ [Stand: 30.01.2014]

³⁴⁴ Vgl. <http://calc.arri.de/calculator> [Stand: 30.01.2014]

Folgend die Tab. 32 mit den wichtigsten technischen Daten des Quartzcolor Polaris:

Parameter	Beschreibung
Lampenkopf:	Fresnel, 1000 W
Lampentyp:	230 V: 1000 W CP40, CP71
Stromverbrauch:	1200 W / 1000 W
Spannungsbereich:	230 V
Dimmbarkeit:	Ja, 0 - 100 % per externem Dimmer
Kabel Optionen:	7m Netzkabel ohne Schutzkontaktstecker
Farbtemperatur:	3200 K
Abstrahlungswinkel:	9° - 59.5°
Gewicht:	6,0 Kg
Größe (HxBxT):	320 x 455 x 290 mm

*Tabelle 32: Technische Daten des Quartzcolor Polaris.*³⁴⁵

Die photometrischen Daten eines Quartzcolor Polaris mit einem „CP40 1000 W / 230 V“ Brenner fasst Tab. 33 zusammen:

Parameter	Abstand 3m in FST:	Abstand 3m in SST:
Lichttech. Größen:	1300 lx, 14444cd, 11765lm	13000 lx, 117543cd, 2277lm
Abstrahlwinkel	59°	9°
Durchmesser	3.39 m	0.47 m

*Tabelle 33: Photometrischen Daten des Quartzcolor Polaris.*³⁴⁶

³⁴⁵ Vgl. http://www.strandarchive.co.uk/lanterns/q_polaris.html [Stand: 30.01.2014]

³⁴⁶ Vgl. http://www.strandarchive.co.uk/lanterns/q_polaris.html [Stand: 30.01.2014]

J. Parameter weiterer LED Scheinwerfer

Die Tab. 34 fasst somit die wichtigsten technischen Daten des ARRI L7T zusammen:

Parameter	Beschreibung
Lampenkopf:	Fokussierbare Fresnel
Lampentyp:	LED
Stromverbrauch:	160 W Nominal, 220 W Maximum
Spannungsbereich:	100 - 250V AC, 50-60Hz
Dimmbarkeit:	0 -100% stufenlos
Kabel Optionen:	Schuko-Stecker, Edison-Anschluss
Abstrahlungswinkel:	15° - 50°
Größe (HxBxT):	Hybrid: 384x374x423 mm Active: 349x374x423 mm
Gewicht:	Hybrid: 10.9 kg Active: 8.2 kg
Farbtemperaturen:	2600 K - 3600 K stufenlos einstellbar
Farbtemperatur Toleranz:	+/- 100 K (nominal), +/- 1/8 Grün-Magenta (nominal)
Grün-Magenta Korrektur:	stufenlos einstellbar (Full Minusgreen Full Plusgreen)
Ansteuerung:	Einfacher Schuko-Stecker, 5-Pin DMX Stecker In und Through, Optional Kontrollierbar am Bedien- und Anzeigefeld , Mini-USB
Umgebungstemperaturen:	Hybrid: -20 - 35° C Active: -20 - 45° C
Lebensdauer:	50.000 Stunden

Tabelle 34: Technische Daten des ARRI L7T.³⁴⁷

Die photometrischen Daten eines ARRI L7T sind in Tab. 35 zusammengestellt:

Parameter	Abstand 3m in FST:	Abstand 3m in SST:
Lichttech. Größen:	811lx, 8418cd, 4762lm	6824lx, 62109cd, 2909lm
Abstrahlwinkel	49°	14°
Durchmesser	2.7 m	0.7 m

Tabelle 35: Photometrischen Daten des ARRI L7T.³⁴⁸

Weiterhin liegt der Farbwiedergabeindex (CRI) in R_a dieses Scheinwerfers laut Angaben des Herstellers bei 94.³⁴⁹

Die bereits gemessenen Spektraldaten von Alan Roberts mit dem TLCI Verfahren sind in Abb. 60 aufgeführt.

³⁴⁷ Vgl. http://www.arri.com/lighting/lighting_equipment/lampheads/led_lampheads/l_series/l7_t/ [Stand: 30.01.2014]

³⁴⁸ Vgl. <http://calc.arri.de/calculator> [Stand: 30.01.2014]

³⁴⁹ Vgl. http://www.arri.com/lighting/lighting_equipment/lampheads/led_lampheads/l_series/l7_t/ [Stand: 30.01.2014]

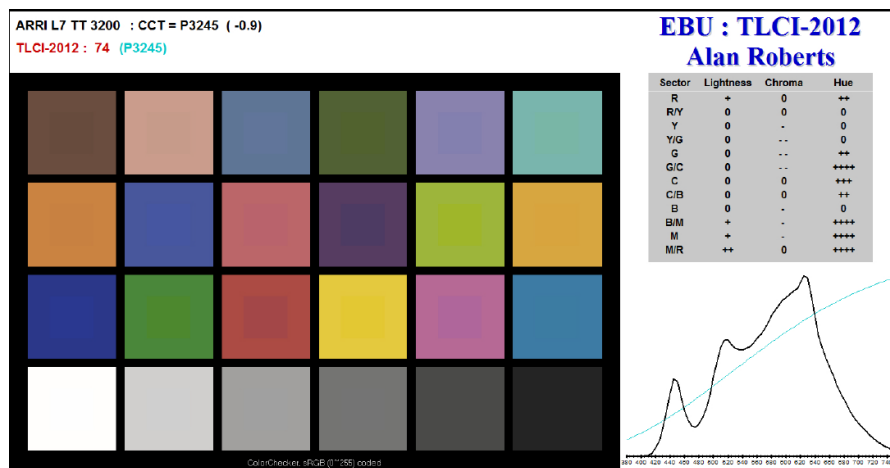


Abbildung 60: Spektralmessung mit TLCI-Messung von Alan Roberts.³⁵⁰

K. Zur Methodik: Rechnungsweg mit Formeln

▪ Berechnung der Ermittelten Werte

Es wurden nun die abgelesenen Spannungswerte in Millivolt der einzelnen Farbanteile (RGB) vom Waveformmonitor der Bildtechnik in RGB-Werte des sRGB-Raums umgerechnet. Dies geschah mit einer Relativierung der Spannungs- und RGB-Werte des Colorcheckers.

Die Colorchecker-Farbprobe Nummer 19 (Reinweiß) hat laut Angaben des Herstellers X-Rite einen gedruckten RGB Wert von Rot=243, Grün=243 und Blau=242.³⁵¹

Ein korrekt ausgeführter Weißabgleich an der Bildtechnik ergibt im Reinweiß der Colorchecker Farbprobe Nummer „19“ Spannungswerte von Rot=0,7 V, Grün=0,7 V und Blau=0,7 V.

Nun wurde relativ zum Reinweiß der Wert der gedruckten Angaben von Rot (243) durch die gemessenen Angaben in Millivolt (0,7V) geteilt. Somit erhält man einen Koeffizienten, mit den man nun alle Spannungswerte in sRGB-Werte transformieren kann.

Ein Beispiel zur Berechnung der Koeffizienten:

ROT: $243/0,7 = 347,14$ || GRÜN: $243/0,7 = 347,14$ || BLAU: $242/0,7 = 345,71$

Ein Beispiel zur Berechnung der sRGB Werte aus den Spannungswerten von Test 1 Farbprobe 1:

³⁵⁰ <http://www.gtc.org.uk/tlci-results.aspx> [Stand: 30.01.2014]

³⁵¹ Vgl. Original gedruckte RGB-Farben von Colorchecker X-Rite stand Dezember 2012

ARRI 650Plus: Rot: $0,287 \cdot 347,14 = 100$ || Rot: $0,216 \cdot 347,14 = 75$ || Rot: $0,174 \cdot 345,71 = 60$

ARRI L7C: Rot: $0,287 \cdot 347,14 = 100$ || Rot: $0,210 \cdot 347,14 = 73$ || Rot: $0,174 \cdot 345,71 = 60$

Hierbei gilt eine Toleranz von 0,5 Einheiten, die gerundet werden.

Nun kann mit den errechneten RGB-Werten weiter im CIELAB2000-Farbraum verfahren werden (siehe Bild oben). Dieser Farbraum benötigt als nächstes die XYZ-Werte aus den RGB-Werten. Diese berechnen sich nach nach ITU Rec 709 (International Television Union – HDTV) mit folgender Formel.³⁵²

$$X = (0,4124564 \times R) + (0,3575761 \times G) + (0,1804375 \times B)$$

$$Y = (0,2126729 \times R) + (0,7151522 \times G) + (0,0721750 \times B)$$

$$Z = (0,0193339 \times R) + (0,1191920 \times G) + (0,9503041 \times B)$$

Diese XYZ-Werte sind wichtig für die Transformierung in den CIELAB-Farbraum (laut Kapitel 2.1.1).

Folgende Formeln waren zur Berechnung notwendig.³⁵³

$$L^* = 116 \times \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_n}} - 16$$

$$a^* = 500 \times \left(\sqrt[3]{\frac{X}{X_n}} - \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_n}} \right)$$

$$b^* = 200 \times \left(\sqrt[3]{\frac{Y}{Y_n}} - \sqrt[3]{\frac{Z}{Z_n}} \right)$$

Die Y_n , X_n und Z_n Faktoren sind Kennziffern der jeweiligen Normlichtart (siehe Kapitel 2.1.1) und sind nach ISO-Norm ISO 3664 - Kriterien für Normlicht definiert.³⁵⁴ Als Normlichtart für die Vergleichsrechnung wurde A mit 2856K Farbtemperatur gewählt, da es leider keine definierten Faktoren für eine Farbtemperatur 3200 K gibt. Weiterhin wurde ein Gesichtsfeld von 10° gewählt, mit $X_{10,A}=111,1626$, $Y_{10,A}=99,9997$ und $Z_{10,A}=35,1956$ (siehe Kapitel 2.1.1).³⁵⁵

Mit den berechneten CIELAB-Werten der einzelnen Vergleichsscheinwerfer kann nun der Metamerieindex Delta E für den Farbraum CIELAB2000 berechnet werden. Hierfür braucht man folgende Formeln und die berechneten Werte jeder zu vergleichenden Lichtquelle.

³⁵² <http://www.wisotop.de/vonRGBnachHSV.shtml> [Stand: 30.01.2014]

³⁵³ <http://de.wikipedia.org/wiki/Lab-Farbraum> [Stand: 30.01.2014]

³⁵⁴ http://de.wikipedia.org/wiki/ISO_3664 [Stand: 30.01.2014]

³⁵⁵ Vgl. Loos 1989, S. 190

Delta E (CIE 2000)³⁵⁶

$$\Delta E = \sqrt{\left(\frac{\Delta L'}{K_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C'}{K_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H'}{K_H S_H}\right)^2 + R_T \left(\frac{\Delta C'}{K_C S_C}\right) \left(\frac{\Delta H'}{K_H S_H}\right)}$$

Wobei gilt:

$$\bar{L}' = (L_1 + L_2)/2$$

$$C_1 = \sqrt{a_1'^2 + b_1'^2}$$

$$C_2 = \sqrt{a_2'^2 + b_2'^2}$$

$$\bar{C} = (C_1 + C_2)/2$$

$$G = \left(1 - \sqrt{\frac{\bar{C}^7}{\bar{C}^7 + 25^7}}\right) / 2$$

$$a_1' = a_1(1 + G)$$

$$a_2' = a_2(1 + G)$$

$$C_1' = \sqrt{a_1'^2 + b_1'^2}$$

$$C_2' = \sqrt{a_2'^2 + b_2'^2}$$

$$\bar{C}' = (C_1' + C_2')/2$$

$$h_1' = \begin{cases} \tan^{-1}(b_1/a_1') & \tan^{-1}(b_1/a_1') \geq 0 \\ \tan^{-1}(b_1/a_1') + 360^\circ & \tan^{-1}(b_1/a_1') < 0 \end{cases}$$

$$h_2' = \begin{cases} \tan^{-1}(b_2/a_2') & \tan^{-1}(b_2/a_2') \geq 0 \\ \tan^{-1}(b_2/a_2') + 360^\circ & \tan^{-1}(b_2/a_2') < 0 \end{cases}$$

$$\bar{H}' = \begin{cases} (h_1' + h_2' + 360^\circ)/2 & |h_1' - h_2'| > 180^\circ \\ (h_1' + h_2')/2 & |h_1' - h_2'| \leq 180^\circ \end{cases}$$

$$T = 1 - 0.17 \cos(\bar{H}' - 30^\circ) + 0.24 \cos(2\bar{H}') + 0.32 \cos(3\bar{H}' + 6^\circ) - 0.20 \cos(4\bar{H}' - 63^\circ)$$

$$\Delta h' = \begin{cases} h_2' - h_1' & |h_2' - h_1'| \leq 180^\circ \\ h_2' - h_1' + 360^\circ & |h_2' - h_1'| > 180^\circ; h_2' \leq h_1' \\ h_2' - h_1' - 360^\circ & |h_2' - h_1'| > 180^\circ; h_2' > h_1' \end{cases}$$

³⁵⁶ http://www.bruceindbloom.com/index.html?Eqn_DeltaE_CIE2000.html [Stand: 30.01.2014]

$$\bar{L}' = (L_1 + L_2)/2$$

$$C_1 = \sqrt{a_1^2 + b_1^2}$$

$$C_2 = \sqrt{a_2^2 + b_2^2}$$

$$\bar{C} = (C_1 + C_2)/2$$

$$G = \left(1 - \sqrt{\frac{\bar{C}^7}{\bar{C}^7 + 25^7}}\right) / 2$$

$$a'_1 = a_1(1 + G)$$

$$a'_2 = a_2(1 + G)$$

$$C'_1 = \sqrt{a_1'^2 + b_1^2}$$

$$C'_2 = \sqrt{a_2'^2 + b_2^2}$$

$$\bar{C}' = (C'_1 + C'_2)/2$$

$$h'_1 = \begin{cases} \tan^{-1}(b_1/a'_1) & \tan^{-1}(b_1/a'_1) \geq 0 \\ \tan^{-1}(b_1/a'_1) + 360^\circ & \tan^{-1}(b_1/a'_1) < 0 \end{cases}$$

$$h'_2 = \begin{cases} \tan^{-1}(b_2/a'_2) & \tan^{-1}(b_2/a'_2) \geq 0 \\ \tan^{-1}(b_2/a'_2) + 360^\circ & \tan^{-1}(b_2/a'_2) < 0 \end{cases}$$

$$\bar{H}' = \begin{cases} (h'_1 + h'_2 + 360^\circ)/2 & |h'_1 - h'_2| > 180^\circ \\ (h'_1 + h'_2)/2 & |h'_1 - h'_2| \leq 180^\circ \end{cases}$$

$$T = 1 - 0.17 \cos(\bar{H}' - 30^\circ) + 0.24 \cos(2\bar{H}') + 0.32 \cos(3\bar{H}' + 6^\circ) - 0.20 \cos(4\bar{H}' - 63^\circ)$$

$$\Delta h' = \begin{cases} h'_2 - h'_1 & |h'_2 - h'_1| \leq 180^\circ \\ h'_2 - h'_1 + 360^\circ & |h'_2 - h'_1| > 180^\circ; h'_2 \leq h'_1 \\ h'_2 - h'_1 - 360^\circ & |h'_2 - h'_1| > 180^\circ; h'_2 > h'_1 \end{cases}$$

$$\Delta L' = L_2 - L_1$$

$$\Delta C' = C'_2 - C'_1$$

$$\Delta H' = 2\sqrt{C'_1 C'_2} \sin(\Delta h'/2)$$

$$S_L = 1 + \frac{0.015(\bar{L}' - 50)^2}{\sqrt{20 + (\bar{L}' - 50)^2}}$$

$$S_C = 1 + 0.045\bar{C}'$$

$$S_H = 1 + 0.015\bar{C}'T$$

$$\Delta\theta = 30 \exp\left\{-\left(\frac{\bar{H}' - 275^\circ}{25}\right)^2\right\}$$

$$R_C = 2\sqrt{\frac{\bar{C}'^7}{\bar{C}'^7 + 25^7}}$$

$$R_T = -R_C \sin(2\Delta\theta)$$

$$K_L = 1 \quad \text{default}$$

$$K_C = 1 \quad \text{default}$$

$$K_H = 1 \quad \text{default}$$

Weiterführend kann wie bereits beschrieben der Farbwiedergabeindex (R_a) wie folgt berechnet werden.³⁵⁷

$$R_i = 100 - 4.6\Delta E_i$$

General color rendering index (CRI):

$$CRI = R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i$$

n = Anzahl der Farbproben, In der Regel 8 Testfarben

Diese Formel entspricht, für Durchschnittsbildung der n-Testfarben, dem arithmetischen Mittelwert.

Im vorliegenden Test wurden zur Beurteilung der Farbwiedergabe nicht, wie beim R_a definiert (Anlage A), 8 Testfarben herangezogen, sondern die 24 Testfarben des Colorcheckers.

Diese o.g. Berechnungen wurden vorgenommen um letztendlich zum CRI des CIELAB2000 zu kommen.

³⁵⁷ http://en.wikipedia.org/wiki/Color_rendering_index [Stand: 30.01.2014]

L. Ergebnisse des Studiotests

Dieser eigens entwickelte Colorchecker wurde im Microsoft Excel 2010 erstellt. Der Farbton der einzelnen Füllfarben der Colorchecker-Tabellenfelder wurden durch – Füllfarbe/Zelle/weitere-Farben/benutzerdefinierte Farben/ Farbmodell RGB - als Rot-, Grün- und Blau- Wert von 0 -255 eingetragen. Wie Abb. 61 verdeutlicht, enthalten die Farbtafeln alle wichtigen Werte für die Vergleichbarkeit.

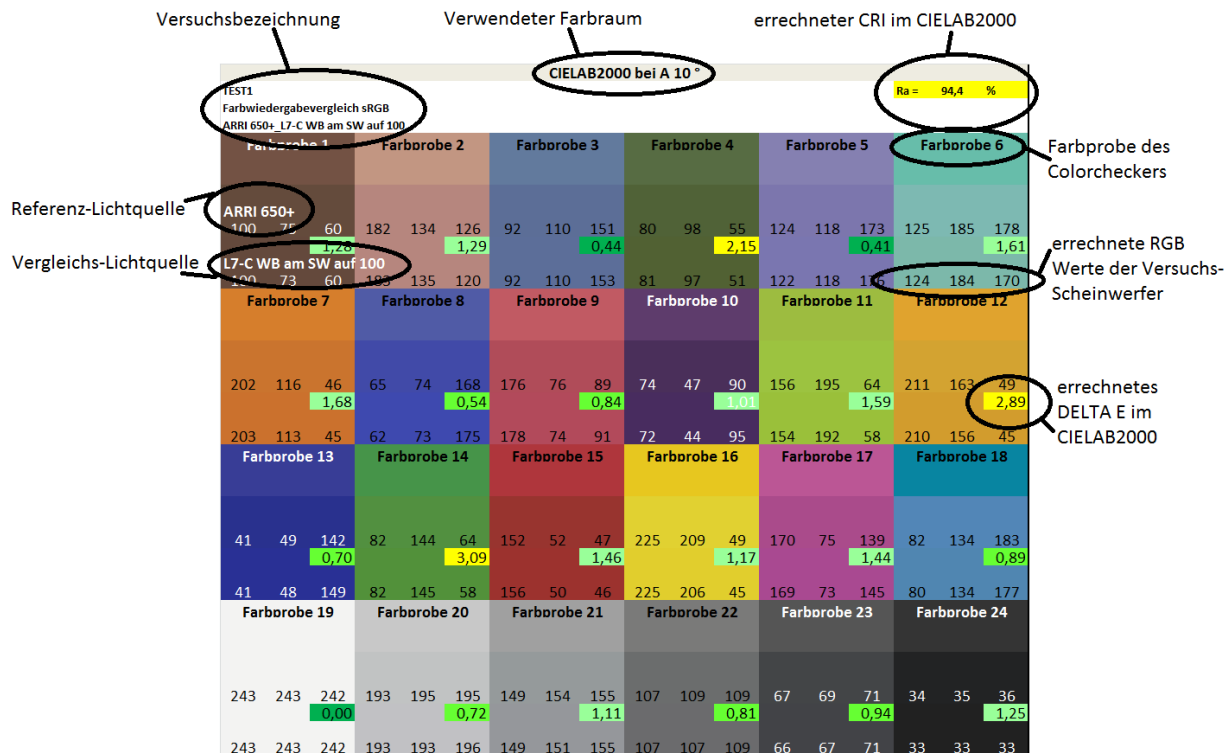


Abbildung 61: Aufbau eines selbstentwickelten Colorcheckers.

Weiterhin wurden die jeweiligen Delta E-Angaben als Abstufung des Metamerieindex (siehe 2.1.1) durch eine Farbcodierung gemäß Abb. 62 zusätzlich zu den numerischen Werten farblich unterschiedlich dargestellt.

Farbcodierung von Farbdifferenz ΔE^*	
0,0 - 0,5	kein bis fast kein Unterschied
0,5 ... 1,0	Unterschied kann für das geübte Auge bemerkbar sein
1,0 ... 2,0	unmerklicher Farbunterschied
2,0 ... 4,0	wahrgenommener Farbunterschied
4,0 ... 5,0	wesentlicher Farbunterschied, der selten toleriert wird
> 5,0	die Differenz wird als andere Farbe bewertet

Abbildung 62: Bedingte Formatierung der Delta E-Werte.

Im Folgenden werden die o.g. selbstentwickelten Colorchecker und Säulendiagramme der errechneten Delta E-Werte für die Colorcheckerfarben 1 - 24 der Vergleichsgruppen 1 - 11 (11 Vergleiche zwischen Referenz- und Vergleichsscheinwerfer) dargestellt.

CIELAB2000 bei A 10 °																	
TEST1																	
Farbwiedergabevergleich sRGB																	
ARRI 650+ L7-C WB am SW auf 100																	
1			2			3			4			5			6		
ARRI 650+																	
100	75	60	182	134	126	92	110	151	80	98	55	124	118	173	125	185	178
		1,28			1,29			0,44			2,15			0,41			1,61
L7-C WB am SW auf 100																	
100	73	60	183	135	120	92	110	153	81	97	51	122	118	176	124	184	170
7			8			9			10			11			12		
202	116	46	65	74	168	176	76	89	74	47	90	156	195	64	211	163	49
		1,68			0,54			0,84			1,01			1,59			2,89
203	113	45	62	73	175	178	74	91	72	44	95	154	192	58	210	156	45
13			14			15			16			17			18		
41	49	142	82	144	64	152	52	47	225	209	49	170	75	139	82	134	183
		0,70			3,09			1,46			1,17			1,44			0,89
41	48	149	82	145	58	156	50	46	225	206	45	169	73	145	80	134	177
19			20			21			22			23			24		
243	243	242	193	195	195	149	154	155	107	109	109	67	69	71	34	35	36
		0,00			0,72			1,11			0,81			0,94			1,25
243	243	242	193	193	196	149	151	155	107	107	109	66	67	71	33	33	33

Abbildung 63: Selbstentwickelter Colorchecker des Test 1.

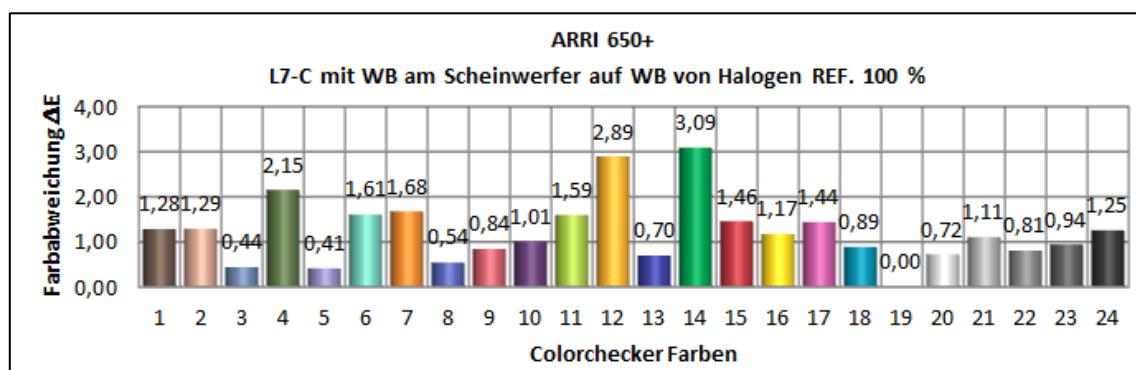


Abbildung 64: Farbdifferenzen Delta E für Test 1.

CIELAB2000 bei A 10 °																	
TEST 2																	
Farbwiedergabevergleich sRGB																	
ARRI 650+ L7-C WB am OCP																	
1			2			3			4			5			6		
ARRI 650+																	
100	75	60	182	134	126	92	110	151	80	98	55	124	118	173	125	185	178
		0,49			0,77			0,32			1,74			0,46			2,02
L7-C WB am OCP																	
99	75	61	182	136	121	91	111	152	80	97	52	121	118	175	124	186	170
7			8			9			10			11			12		
202	116	46	65	74	168	176	76	89	74	47	90	156	195	64	211	163	49
		0,89			0,38			0,58			1,13			1,25			2,16
203	114	44	62	74	174	176	75	90	70	45	93	154	193	59	209	158	45
13			14			15			16			17			18		
41	49	142	82	144	64	152	52	47	225	209	49	170	75	139	82	134	183
		0,51			2,76			0,73			0,70			1,97			0,91
41	49	147	81	146	59	153	51	46	224	207	46	167	74	144	81	135	177
19			20			21			22			23			24		
243	243	242	193	195	195	149	154	155	107	109	109	67	69	71	34	35	36
		0,00			0,13			0,34			0,26			0,52			0,22
243	243	242	192	195	196	149	153	155	106	108	110	66	68	71	33	35	36

Abbildung 65: Selbstentwickelter Colorchecker des Test 2.

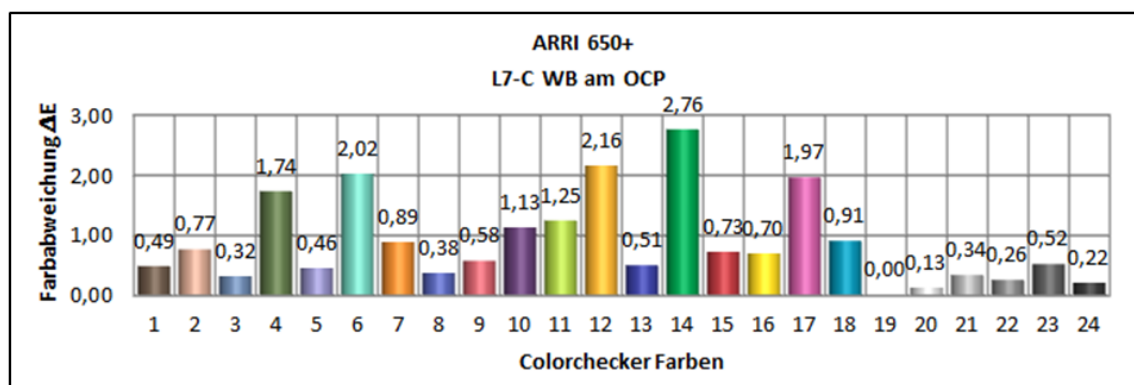


Abbildung 66: Farbdifferenzen Delta E für Test 2.

CIELAB2000 bei A 10 °																	
TEST 3																	
Farbwiedergabevergleich sRGB																	
ARRI 650+ L7-C WB am OCP auf NR. 2 von 100																	
1			2			3			4			5			6		
ARRI 650+			ARRI 650+			ARRI 650+			ARRI 650+			ARRI 650+			ARRI 650+		
100	75	60	182	134	126	92	110	151	80	98	55	124	118	173	125	185	178
1,12			0,03			1,56			1,86			0,93			0,39		
L7-C WB am OCP auf NR. 2 von 100			L7-C WB am OCP auf NR. 2 von 100			L7-C WB am OCP auf NR. 2 von 100			L7-C WB am OCP auf NR. 2 von 100			L7-C WB am OCP auf NR. 2 von 100			L7-C WB am OCP auf NR. 2 von 100		
99	73	60	182	134	125	79	109	158	79	97	52	121	116	182	123	184	176
7			8			9			10			11			12		
202			65			176			74			156			211		
1,65			1,01			1,67			1,62			1,23			2,65		
203			61			176			69			154			210		
113			72			73			43			193			157		
43			182			93			96			59			44		
13			14			15			16			17			18		
41			82			152			225			170			82		
49			144			52			209			75			134		
142			64			47			49			139			183		
1,21			2,37			1,70			0,93			3,11			0,82		
39			81			154			225			167			77		
45			145			49			207			72			132		
154			59			44			45			150			183		
19			20			21			22			23			24		
243			193			149			107			67			34		
243			195			154			109			69			35		
242			195			155			109			71			36		
1,18			1,64			1,54			1,43			1,23			1,85		
243			193			150			107			65			31		
243			195			152			107			67			31		
252			206			162			114			72			31		

Abbildung 67: Selbstentwickelter Colorchecker des Test 3.

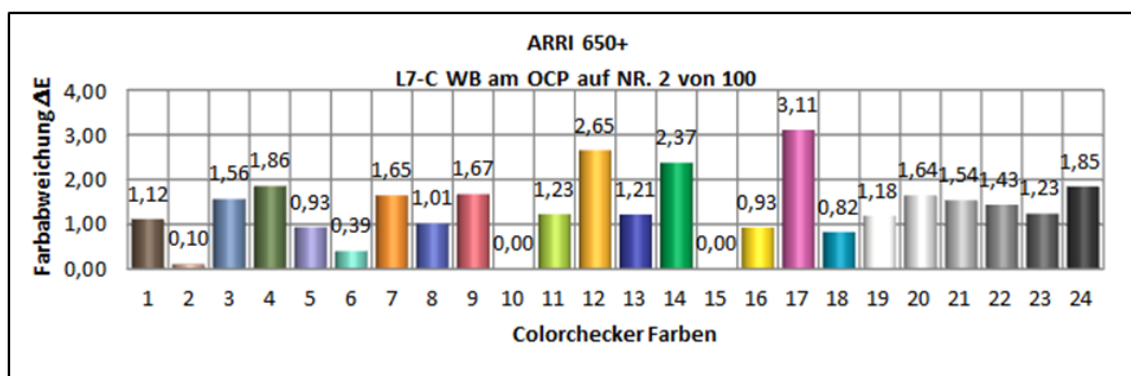


Abbildung 68: Farbdifferenzen Delta E für Test 3.

CIELAB2000 bei A 10 °																	
TEST 4																	
Farbwiedergabevergleich sRGB																	
ARRI 650+ L7-C WB auf 100																	
1			2			3			4			5			6		
ARRI 650+			ARRI 650+			ARRI 650+			ARRI 650+			ARRI 650+			ARRI 650+		
100	75	60	182	134	126	92	110	151	80	98	55	124	118	173	125	185	178
L7-C WB auf 100			L7-C WB auf 100			L7-C WB auf 100			L7-C WB auf 100			L7-C WB auf 100			L7-C WB auf 100		
97	73	52	179	136	108	89	111	138	81	97	44	118	118	159	127	190	165
7			8			9			10			11			12		
202	116	46	65	74	168	176	76	89	74	47	90	156	195	64	211	163	49
200			200			200			200			200			200		
114	38	61	74	159	173	74	81	69	45	84	152	193	50	206	156	38	38
13			14			15			16			17			18		
41	49	142	82	144	64	152	52	47	225	209	49	170	75	139	82	134	183
40			40			40			40			40			40		
48	135	82	145	52	151	50	40	221	207	38	164	75	134	75	132	160	160
19			20			21			22			23			24		
243	243	242	193	195	195	149	154	155	107	109	109	67	69	71	34	35	36
241			241			241			241			241			241		
245	222	190	196	180	148	153	141	105	109	100	65	69	63	32	34	32	32

Abbildung 69: Selbstentwickelter Colorchecker des Test 4.

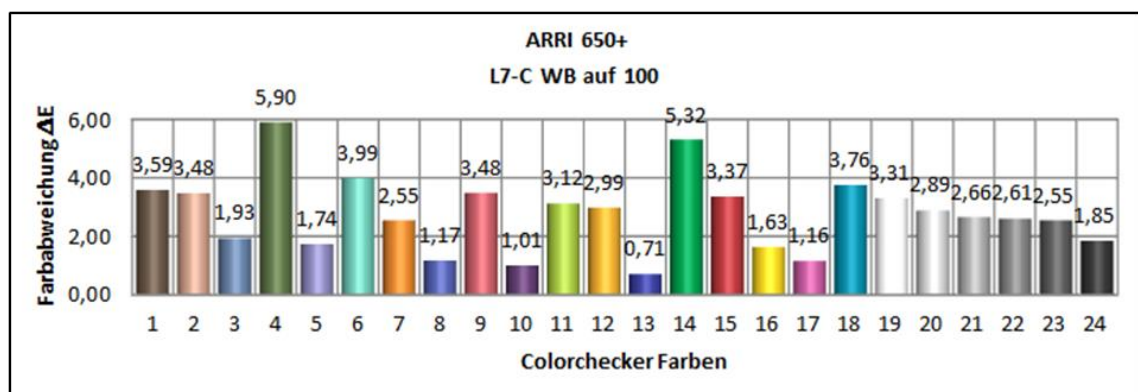


Abbildung 70: Farbdifferenzen Delta E für Test 4.

CIELAB2000 bei A 10 °																	
TEST 5																	
Farbwiedergabevergleich sRGB																	
ARRI 650+ L7-T WB am OCP																	
1			2			3			4			5			6		
ARRI 650+																	
100	75	60	182	134	126	92	110	151	80	98	55	124	118	173	125	185	178
1,11			1,53			0,22			2,84			0,43			2,21		
L7-T WB am OCP																	
97	72	58	183	135	119	92	110	152	79	98	50	123	118	176	126	188	172
7			8			9			10			11			12		
202	116	46	65	74	168	176	76	89	74	47	90	156	195	64	211	163	49
1,77			0,49			0,97			1,04			1,65			2,38		
203	112	42	61	73	174	178	74	89	71	44	94	158	196	59	215	161	45
13			14			15			16			17			18		
41	49	142	82	144	64	152	52	47	225	209	49	170	75	139	82	134	183
0,89			3,54			1,35			1,11			1,55			1,49		
38	45	147	81	146	57	154	50	45	228	210	45	169	74	145	84	138	180
19			20			21			22			23			24		
243	243	242	193	195	195	149	154	155	107	109	109	67	69	71	34	35	36
0,00			0,28			0,41			0,34			0,37			0,31		
243	243	242	193	195	197	150	153	155	107	108	110	66	68	71	33	35	35

Abbildung 71: Selbstentwickelter Colorchecker des Test 5.

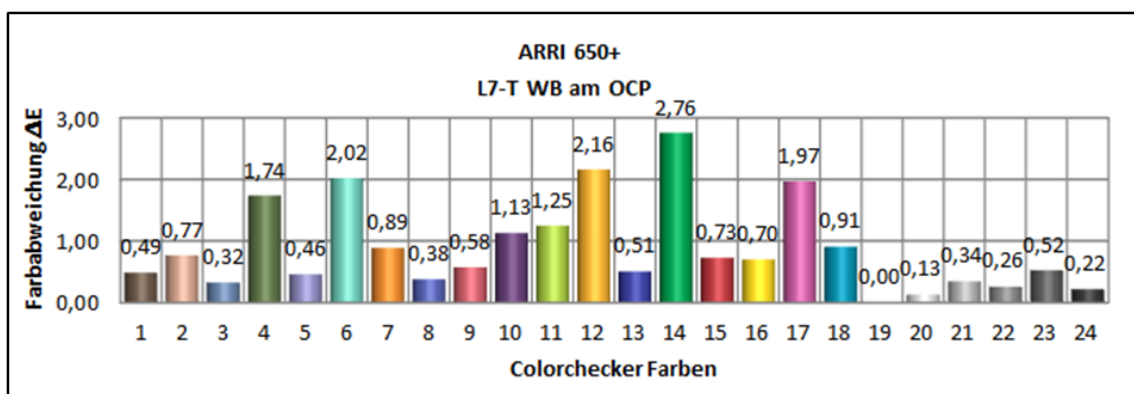


Abbildung 72: Farbdifferenzen Delta E für Test 5.

CIELAB2000 bei A 10 °																	
TEST 6																	
Farbwiedergabevergleich sRGB																	
ARRI 650+ L7-T WB auf 100																	
1			2			3			4			5			6		
ARRI 650+																	
100	75	60	182	134	126	92	110	151	80	98	55	124	118	173	125	185	178
7,03			4,47			2,12			9,24			1,51			6,44		
L7-T WB auf 100																	
96	73	46	181	136	105	91	111	136	79	98	39	122	118	158	125	189	154
7			8			9			10			11			12		
202	116	46	65	74	168	176	76	89	74	47	90	156	195	64	211	163	49
4,86			1,48			6,42			1,75			4,29			3,59		
200	112	30	60	73	157	175	73	75	70	44	81	156	196	46	212	160	36
13			14			15			16			17			18		
41	49	142	82	144	64	152	52	47	225	209	49	170	75	139	82	134	183
1,53			7,34			6,70			2,55			2,51			3,88		
37	46	131	80	145	45	152	50	34	225	209	32	167	75	129	85	139	162
19			20			21			22			23			24		
243	243	242	193	195	195	149	154	155	107	109	109	67	69	71	34	35	36
4,08			3,56			3,71			3,54			4,35			7,36		
243	243	215	190	194	175	148	153	137	105	108	95	66	68	58	33	34	23

Abbildung 73: Selbstentwickelter Colorchecker des Test 6.

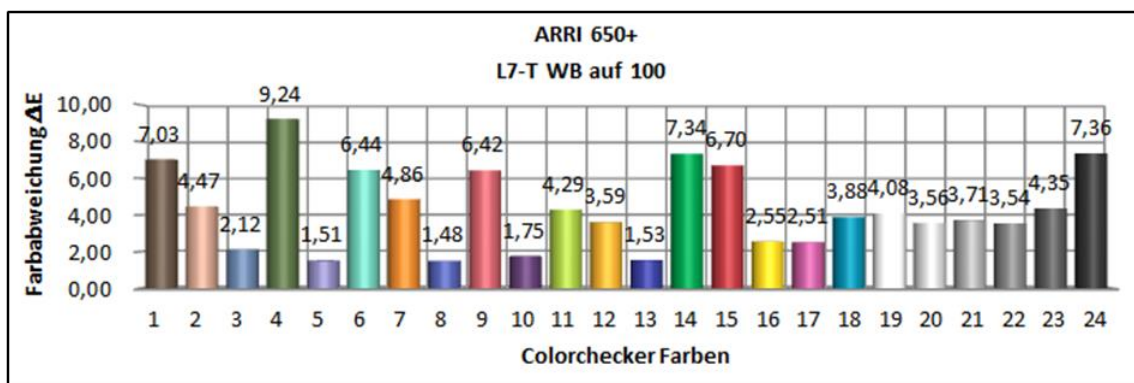


Abbildung 74: Farbdifferenzen Delta E für Test 6.

CIELAB2000 bei A 10 °																	
TEST 7																	
Farbwiedergabevergleich sRGB																	
ARRI 650+ L7-T mit WB am Scheinwerfer auf WB von Halogen REF. 100 %																	
1			2			3			4			5			6		
ARRI 650+																	
100	75	60	182	134	126	92	110	151	80	98	55	124	118	173	125	185	178
		1,91			1,99			0,40			4,50			0,34			2,69
L7-T mit WB am Scheinwerfer auf WB von Halogen REF. 100 %																	
98	73	55	182	135	116	92	109	150	79	97	47	123	119	174	126	188	169
7			8			9			10			11			12		
202	116	46	65	74	168	176	76	89	74	47	90	156	195	64	211	163	49
		2,56			0,54			1,78			0,90			2,58			3,33
202	112	38	62	73	174	178	73	86	70	44	92	157	195	54	215	160	40
		13			14			15			16			17			18
41	49	142	82	144	64	152	52	47	225	209	49	170	75	139	82	134	183
		0,98			5,02			3,29			1,70			1,06			1,58
38	45	146	82	146	53	155	50	41	228	209	41	169	74	143	84	138	178
19			20			21			22			23			24		
243	243	242	193	195	195	149	154	155	107	109	109	67	69	71	34	35	36
		0,00			0,21			0,77			0,76			0,84			3,15
243	243	242	193	194	195	150	152	152	107	107	106	66	68	68	35	35	30

Abbildung 75: Selbstentwickelter Colorchecker des Test 7.

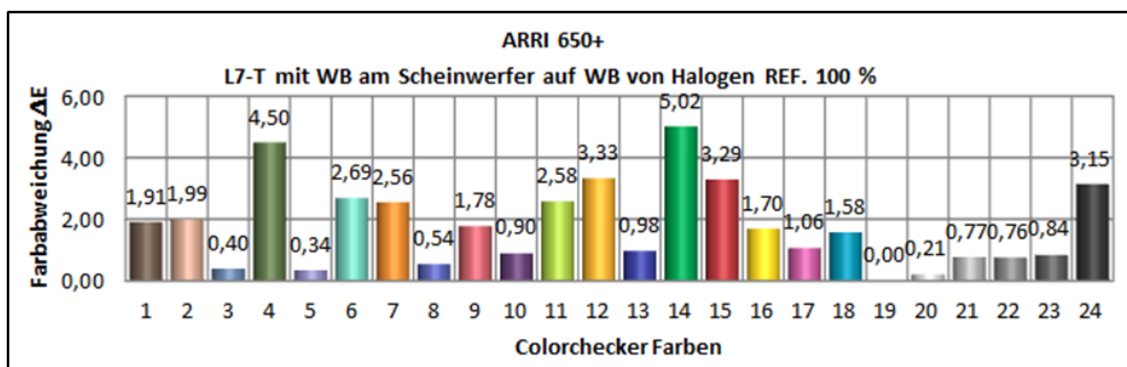


Abbildung 76: Farbdifferenzen Delta E für Test 7.

CIELAB2000 bei A 10 °																			
TEST 8															Ra ₈ =			93,5	%
Farbwiedergabevergleich sRGB																			
ARRI 650+ ARRI 650+, WD 1/2, WB auf 100																			
1			2			3			4			5			6				
ARRI 650+																			
100	75	60	182	134	126	92	110	151	80	98	55	124	118	173	125	185	178		
0,90			2,41			1,68			0,81			1,24			1,38				
ARRI 650+, WD 1/2, WB auf 100																			
102	77	60	191	137	124	99	115	149	84	99	55	131	120	171	132	188	176		
7			8			9			10			11			12				
202	116	46	65	74	168	176	76	89	74	47	90	156	195	64	211	163	49		
2,18			0,45			2,88			1,22			0,94			2,10				
208	115	46	70	75	167	184	77	87	78	47	89	162	197	65	218	163	48		
13			14			15			16			17			18				
41	49	142	82	144	64	152	52	47	225	209	49	170	75	139	82	134	183		
0,32			1,15			1,81			1,50			2,70			2,26				
44	50	138	86	146	64	160	53	49	235	213	52	177	76	137	95	140	183		
19			20			21			22			23			24				
243	243	242	193	195	195	149	154	155	107	109	109	67	69	71	34	35	36		
1,03			0,94			1,19			1,12			0,79			0,76				
245	243	234	197	195	190	153	153	148	110	108	105	69	69	69	35	35	35		

Abbildung 77: Selbstentwickelter Colorchecker des Test 8.

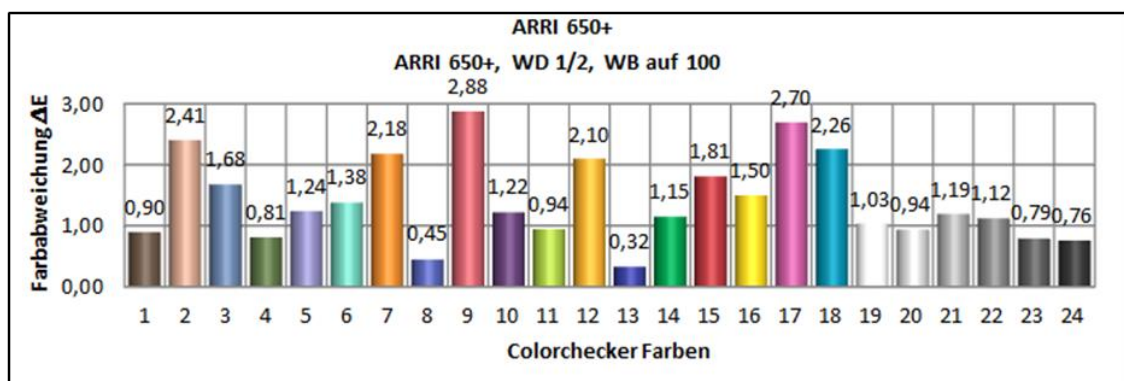


Abbildung 78: Farbdifferenzen Delta E für Test 8.

CIELAB2000 bei A 10 °																	
TEST 9																	
Farbwiedergabevergleich sRGB																	
ARRI 650+ T1, gedimmt 63% WB auf 100																	
1			2			3			4			5			6		
ARRI 650+			ARRI 650+			ARRI 650+			ARRI 650+			ARRI 650+			ARRI 650+		
100	75	60	182	134	126	92	110	151	80	98	55	124	118	173	125	185	178
T1, gedimmt 63% WB auf 100			T1, gedimmt 63% WB auf 100			T1, gedimmt 63% WB auf 100			T1, gedimmt 63% WB auf 100			T1, gedimmt 63% WB auf 100			T1, gedimmt 63% WB auf 100		
102	73	53	189	131	113	94	105	137	82	94	47	126	112	154	124	176	157
7			8			9			10			11			12		
202	116	46	65	74	168	176	76	89	74	47	90	156	195	64	211	163	49
T1, gedimmt 63% WB auf 100			T1, gedimmt 63% WB auf 100			T1, gedimmt 63% WB auf 100			T1, gedimmt 63% WB auf 100			T1, gedimmt 63% WB auf 100			T1, gedimmt 63% WB auf 100		
207	113	42	68	72	152	179	71	77	74	43	78	156	185	53	210	154	40
13			14			15			16			17			18		
41	49	142	82	144	64	152	52	47	225	209	49	170	75	139	82	134	183
T1, gedimmt 63% WB auf 100			T1, gedimmt 63% WB auf 100			T1, gedimmt 63% WB auf 100			T1, gedimmt 63% WB auf 100			T1, gedimmt 63% WB auf 100			T1, gedimmt 63% WB auf 100		
43	47	128	85	139	56	157	49	42	226	200	39	170	69	122	76	121	157
19			20			21			22			23			24		
243	243	242	193	195	195	149	154	155	107	109	109	67	69	71	34	35	36
T1, gedimmt 63% WB auf 100			T1, gedimmt 63% WB auf 100			T1, gedimmt 63% WB auf 100			T1, gedimmt 63% WB auf 100			T1, gedimmt 63% WB auf 100			T1, gedimmt 63% WB auf 100		
250	238	219	199	192	178	153	148	137	109	103	96	67	65	61	35	32	29

Abbildung 79: Selbstentwickelter Colorchecker des Test 9.

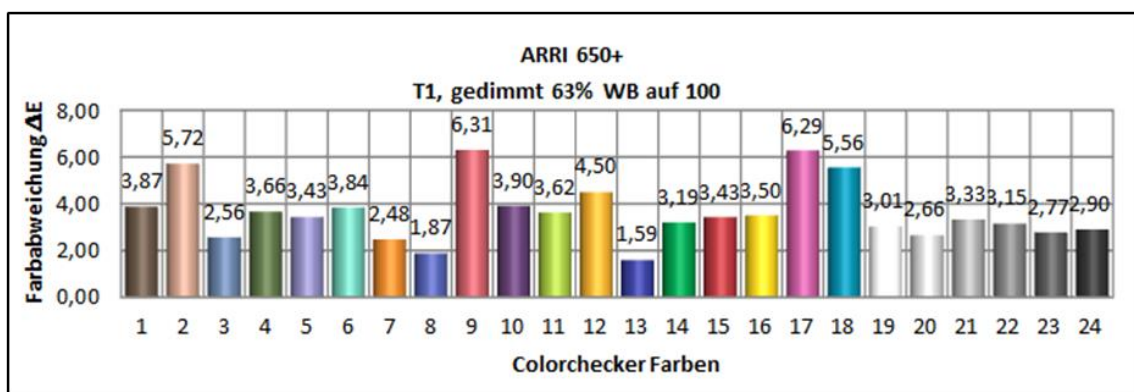


Abbildung 80: Farbdifferenzen Delta E für Test 9.

CIELAB2000 bei A 10 °																	
TEST 10																	
Farbwiedergabevergleich sRGB																	
ARRI 650+ Quartzcolor OCP auf 100																	
1			2			3			4			5			6		
ARRI 650+			ARRI 650+			ARRI 650+			ARRI 650+			ARRI 650+			ARRI 650+		
100	75	60	182	134	126	92	110	151	80	98	55	124	118	173	125	185	178
Quartzcolor OCP auf 100			Quartzcolor OCP auf 100			Quartzcolor OCP auf 100			Quartzcolor OCP auf 100			Quartzcolor OCP auf 100			Quartzcolor OCP auf 100		
109	78	57	197	139	117	102	114	140	89	101	52	139	123	164	141	194	171
7			8			9			10			11			12		
202	116	46	65	74	168	176	76	89	74	47	90	156	195	64	211	163	49
Quartzcolor OCP auf 100			Quartzcolor OCP auf 100			Quartzcolor OCP auf 100			Quartzcolor OCP auf 100			Quartzcolor OCP auf 100			Quartzcolor OCP auf 100		
214	117	43	77	75	156	188	78	81	82	49	82	170	200	61	228	168	45
13			14			15			16			17			18		
41	49	142	82	144	64	152	52	47	225	209	49	170	75	139	82	134	183
Quartzcolor OCP auf 100			Quartzcolor OCP auf 100			Quartzcolor OCP auf 100			Quartzcolor OCP auf 100			Quartzcolor OCP auf 100			Quartzcolor OCP auf 100		
47	51	132	89	145	59	165	53	47	241	213	47	185	76	129	98	141	174
19			20			21			22			23			24		
243	243	242	193	195	195	149	154	155	107	109	109	67	69	71	34	35	36
Quartzcolor OCP auf 100			Quartzcolor OCP auf 100			Quartzcolor OCP auf 100			Quartzcolor OCP auf 100			Quartzcolor OCP auf 100			Quartzcolor OCP auf 100		
254	243	221	203	193	178	160	153	140	114	109	98	72	70	65	42	38	35

Abbildung 81: Selbstentwickelter Colorchecker des Test 10.

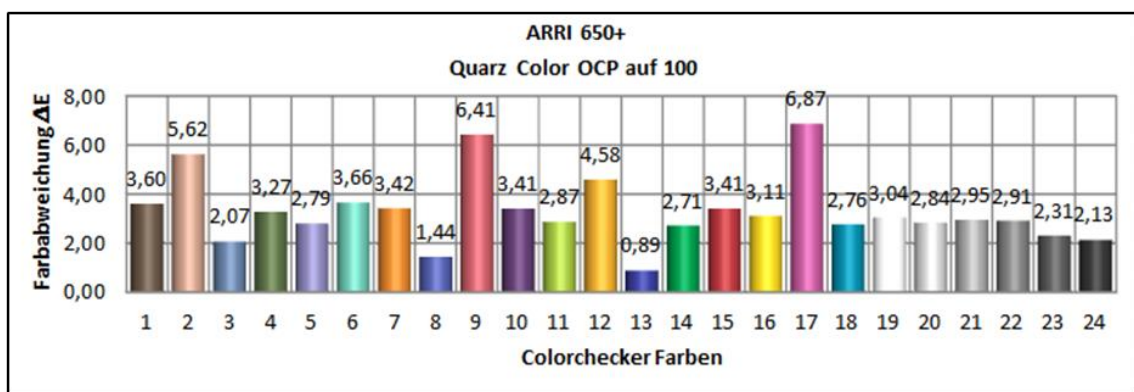


Abbildung 82: Farbdifferenzen Delta E für Test 10.

CIELAB2000 bei A 10 °																	
TEST 11																	
Farbwiedergabevergleich sRGB																	
L7-C WB am OCP zu L7-T WB auf 100 L7C																	
1			2			3			4			5			6		
L7-C WB am OCP																	
99	75	61	182	136	121	91	111	152	80	97	52	121	118	175	124	186	170
2,10			1,77			0,42			0,89			0,69			1,25		
L7-T WB auf 100 L7C																	
100	73	57	185	135	118	94	111	149	82	97	50	126	118	173	129	190	169
7			8			9			10			11			12		
203	114	44	62	74	174	176	75	90	70	45	93	154	193	59	209	158	45
1,47			0,57			2,48			1,07			2,00			2,33		
205	112	41	63	73	171	181	73	87	73	44	92	159	196	58	218	160	43
13			14			15			16			17			18		
41	49	147	81	146	59	153	51	46	224	207	46	167	74	144	81	135	177
1,02			1,07			1,30			1,35			1,78			1,16		
39	45	145	83	145	56	156	50	45	231	210	44	172	73	143	86	138	177
19			20			21			22			23			24		
243	243	242	192	195	196	149	153	155	106	108	110	66	68	71	33	35	36
0,60			0,68			0,72			0,65			0,65			1,47		
246	243	238	196	195	193	153	153	152	109	109	109	68	68	70	35	33	36

Abbildung 83: Selbstentwickelter Colorchecker des Test 11.

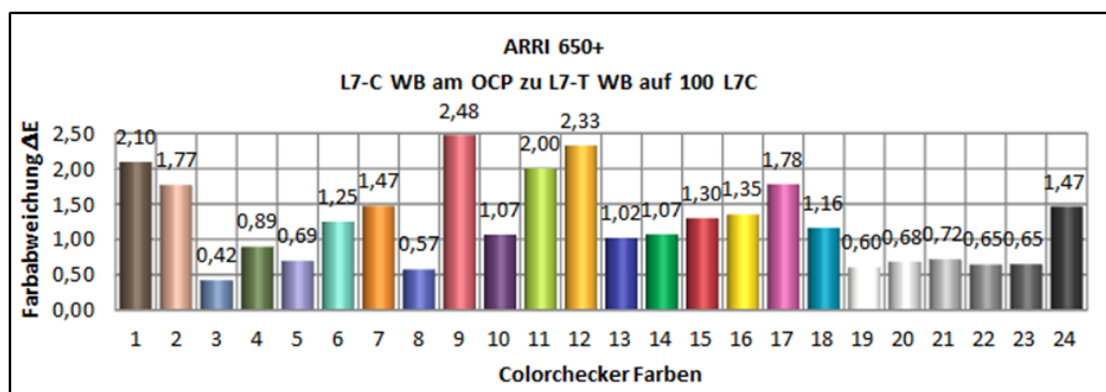


Abbildung 84: Farbdifferenzen Delta E für Test 11.

M. Ergänzende Abbildungen zur Auswertung

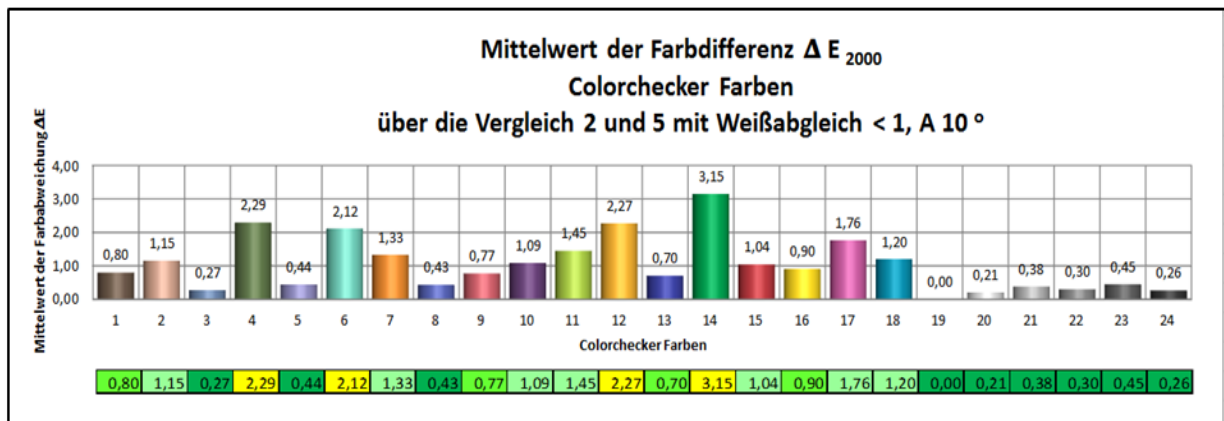


Abbildung 85: Mittelwert der Farbdifferenzen Delta E der Tests 2 und 5.

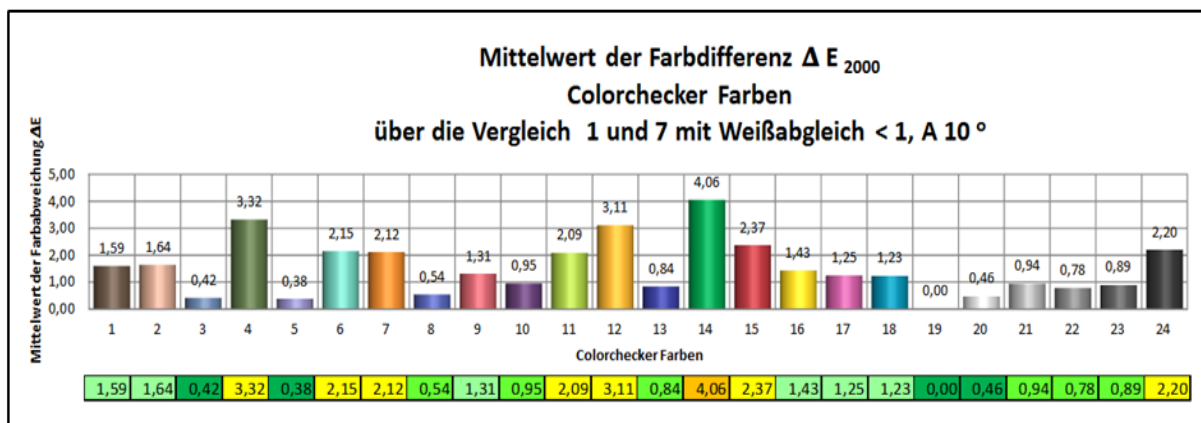


Abbildung 86: Mittelwert der Farbdifferenzen Delta E der Tests 1 und 7.

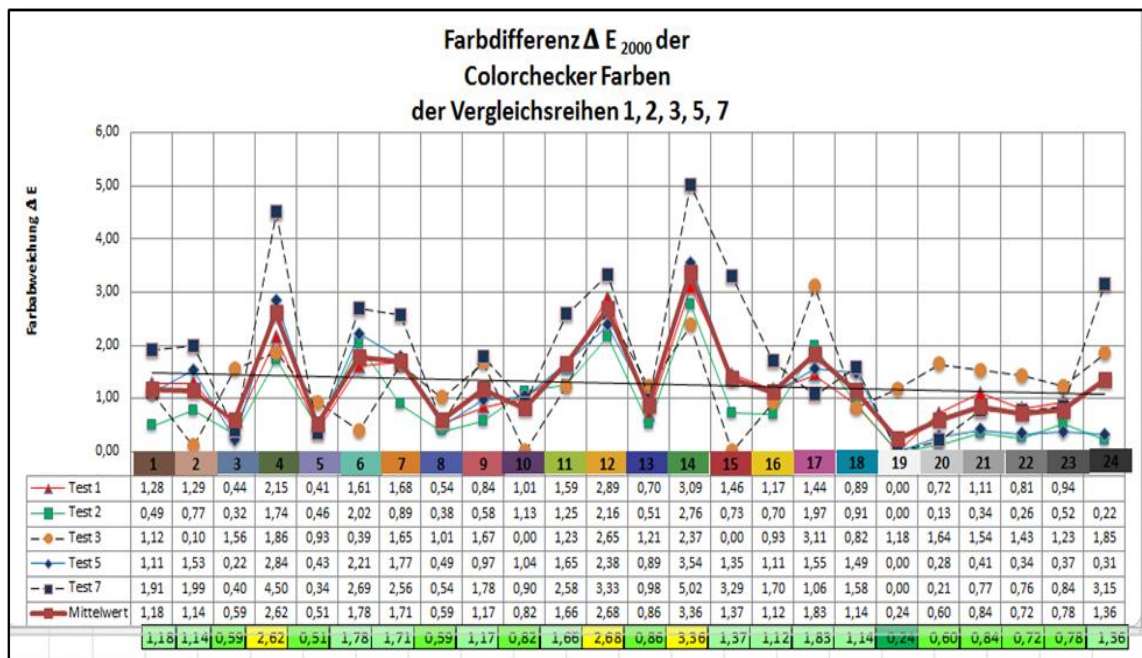


Abbildung 87: Mittelwert der Farbdifferenzen Delta E der Tests 1, 2, 3, 5, 7.

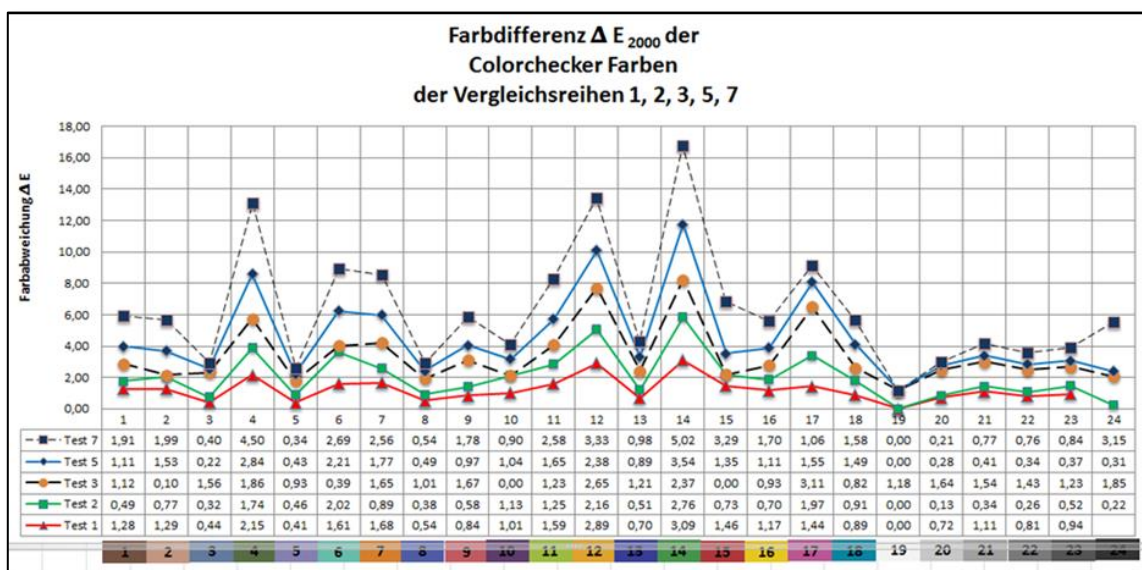


Abbildung 88: Kumulierter Mittelwert der Farbdifferenzen Delta E der Tests 1, 2, 3, 5, 7.

N. Auszüge aus den Interviews

Auszug aus dem Interview vom 14.01.14 mit Dennis Jackstien

Wer sind Sie und was machen Sie genau bei ARRI?

Dennis Jackstien, Dipl. Ing. für Medientechnik, 4,5 Jahre in der Entwicklungsabteilung ARRI Lichttechnik beschäftigt, danach 2,5 Jahre im Produktmanagement. Aktuell freiberuflich für ARRI tätig für Workshops, Präsentationen usw. zum Thema Lichttechnik, Lichtgestaltung mit Schwerpunkt LED.

Wie lang wird im Allgemeinen schon an LED-Stufenlinsen geforscht und seit wann sind solche Technologien schon auf dem Markt und sind solche Systeme bereits vollständig oder teilweise in Fernsehstudios etabliert?

ARRI hat bereits 2004 begonnen, mit LEDs zu testen und zu forschen und war damit einer der ersten Filmlichthersteller am Markt. Die ersten LED-Leuchten von ARRI kamen dann erst 2007 auf den Markt (PAX-System), da man von Anfang an qualitativ sehr hochwertiges LED-Licht erzeugen wollte und von Beginn an auf Mehrkanal-Lösungen gesetzt hat. Die Entwicklung dafür hat entsprechend Zeit bedurft.

Fernsehstudios rüsten mehr und mehr auf LED um. Gerade für Neubauten ist die LED-Technologie höchst interessant, da in vielen Punkten der klassischen Halogen-Technologie weit überlegen. Noch arbeiten die meisten Studios aber mit Halogen.

Werden sich LED-Stufenlinsen in Zukunft großflächig durchsetzen? Wenn ja wo könnten mögliche Einsatzgebiete sein?

Im TV, Event und Theaterbereich definitiv! Stufenlose Farbeinstellmöglichkeiten, geringer Stromverbrauch, keine Wärme im Licht und allgemein viel geringere Wärmeabstrahlung als Halogen, kein Brennerwechsel mehr, kein Streulicht, ... es gibt so viele Vorteile. Im Locationbereich (Filmdreh) ist es etwas schwieriger, da hier auch Größe und Gewicht sehr wichtige Faktoren sind und da sind LED-Stufenlinsen den klassischen Technologien noch unterlegen. Dennoch werden auch hier bereits LED-Stufenlinsen eingesetzt.

Wird die LED-Technologie die Infrastruktur von Studios in Zukunft verändern? Wird es dadurch vielleicht neue Beleuchtungskonzepte und Techniken geben?

Man kann mehr mit Farben und Farbwechseln experimentieren, auch LIVE. Kühlaufwand in Studios kann dramatisch reduziert werden und auch die sonstige Distribution (Infrastruktur). Im Einsatz dann war es ARRI aber auch sehr wichtig, das klassisch gute Konzept der Stufenlinsenscheinwerfer beizubehalten. Nicht umsonst hat sich das über Jahrzehnte durchgesetzt. Fokussierung, saubere Schattenbildung, Einsatz von Flügeltoren usw. Überholte LED-Konzepte, die diese Eigenschaften nicht bieten konnten (Stichwort: Mehrfachschatten) haben sich eben auch nicht durchgesetzt.

Werden LED-Stufenlinsen in Zukunft noch mehr Lichtstärken aufweisen können?

Sicherlich. Die LED-Technologie entwickelt sich weiter und auch wird man durch optimierte Kühlsysteme mehr Leistung in einem Scheinwerfer verbauen können. Das Wärmemanagement ist immer der begrenzende Faktor! Deshalb ist es sehr schwierig, leistungsstarke Scheinwerfer wie den L7 zu bauen, ohne dabei die LEDs zu stark zu erhitzen. LED-Ersatz für 2KW-Halogenstufenlinsen wird es in den nächsten Jahren geben, aber ein 5KW-Ersatz z.B. ist noch in weiter Ferne. Von klassischen Tageslichtscheinwerfern ganz zu schweigen.

Welche Testmethode wird sich in Zukunft durchsetzen (CQS, TLCI oder weiterhin CIE)?**Wird****CIE****vollständig****abgeschafft?**

Das kann niemand mit Gewissheit sagen. An der Zeit wäre es für neue Methoden, aber hierfür müssen sich viele Hersteller und Gremien abstimmen! TLCI ist für den Fernsehbereich sehr interessant.

Rkra: Interessant am TLCI ist natürlich, dass typische spektrale Kameraeigenschaften (von 3-Chip HDTV-Kameras) mit berücksichtigt werden. CQS oder CRI bewerten ausschließlich für das menschliche Auge.

Warum ist das CIE für LED-Stufenlinsen nicht gut geeignet? Warum entstehen starke Farbschwankungen trotz hohem Farbwiedergabeindex?

Nicht nur für LED-Stufenlinsen, sondern für LED generell. CRI basiert auf einer alten, fehlerbehafteten Bewertungsmethode und nutzt nur 8 Testfarben. Für weitgehend kontinuierliche Strahler ist das noch verschmerzbar (Halogen, HMI), aber LEDs, mit tw. sehr diskontinuierlichen Spektren erzeugen hier durchaus verfälschte und unplausible Ergebnisse. Das ein LED-Scheinwerfer bei den 8 ausschließlich pastelligen Testfarben gute Ergebnisse zeigt, bedeutet nicht, dass er bei gesättigten Farben auch gut abschneidet. Meistens haben LEDs hier Probleme, was die CRI-Methode aber gar nicht testet. TLCI z.B. arbeitet mit 24 Testfarben.

Die Bewertungen zum Farbabstand, die dem CRI zu Grunde liegen, wurden damals nicht ausreichend sorgfältig durchgeführt. Jeder Mensch sieht verschieden und daher ist es z.B. wichtig, mit sehr vielen Menschen zu testen um einen guten Mittelwert zu erhalten. Bei neueren Methoden wie DIN99 oder CIE2000 wurde das besser berücksichtigt.

Wird in Zukunft eine AKKU betriebene LED-Stufenlinsen mit sogar Bluetooth DMX realisiert?

Nicht unwahrscheinlich. Ob es nun Bluetooth DMX wird? Aber Akkubetrieb und auch Funksteuerung sind sicher willkommene Ergänzungen für einige Anwender.

Mgen: zum Thema „Bluetooth DMX“: Ich halte diese Art der Funksteuerung für nicht besonders geeignet wegen geringer Reichweite und hohem Störfaktor durch andere Bluetooth-Geräte. Die Zukunft wird eher Zigbee (gerne bei der Steuerung von Straßenbeleuchtung verwendet), WiFi oder WDMX über GSM-Frequenzen und Frequenz-Hopping sein.

Welche Lichtstärken benötigt man in heutigen Fernsehstudios und welche Abstrahlwinkel werden für Stufenlinsen bevorzugt?

Abstrahlwinkel: Sowohl ein enger Spot als ein weiter Flood sind wichtig. Natürlich stufenlos einstellbar. Fixed-Focus Produkte haben sich nicht durchgesetzt.

Lichtstärken können bei modernen Kameras immer geringer ausfallen. Ich habe von Studios gehört, die mit 200 Lux arbeiten. Wahrscheinlich könnte man für die Kameras noch weiter runtergehen, aber irgendwann wird es für die im Studio arbeitenden Leute zu dunkel :-)

Was halten Sie von der Testmethode mit Waveformmonitor und Vektorskop an Hand des YpbPr Farbmodells?

Gute Methode, um schnell einen Vergleich durchzuführen. Viel besser, als z.B. mit dem Farbtemperaturmessgerät zu prüfen! Farbtemperaturmessgeräte geben die Farbe von LEDs oft verfälscht wieder! Selbst ein teures Spektrometer als Messgerät ist für den konkreten Anwendungsfall in einem TV-Studio nicht besser als der WFM. Entscheidend ist doch, was die Kamera sieht! Das Spektrometer versucht in aller Regel, das menschliche Auge abzubilden.

Genauer ist es, das Testbild direkt durch eine Computersoftware analysieren und die RGB-Werte ermitteln zu lassen (ARRI macht es intern so), aber diese Methode ist für TV-Studios mit oft knappem Zeitbudget und einen schnellen Test nicht zweckmäßig. Es geht hier dann im Praxisfall auch nicht um die 2. Stelle nach dem Komma, sondern eine gute, brauchbare Abschätzung. Dafür ist die Methode über WFM gut geeignet.

Können Sie prozentual grob einschätzen, Wie viel mehr Arbeitsaufwand in der Produktion von neuartigen LED-Stufenlinsen gegenüber konventionellen Stufenlinsen steckt?

Bei einem Scheinwerfer, wie dem L7 kommen Themen wie aufwendige Elektronik, Mikroprozessoren, Software-Routinen, Kalibrierung, computerberechnete Optiken (3 bei jedem L7!) und und und dazu, die bei konventionellen Scheinwerfern nicht existierten. Der Produktionsaufwand ist um ein vielfaches höher.

Natürlich gibt es auch einfache LED-Stufenlinsen mit nur einer Farbe, die oft in den selben Gehäusen stecken, wie sonst die konventionellen Scheinwerfer. Hier ist der Mehraufwand natürlich überschaubar. Der L7 hingegen, ist eigentlich ein exakt kalibrierter Computer, der Licht erzeugt.

Was können neuartige LED-Stufenlinsen bereits für Lichtstärken und Leistungen erreichen und dadurch schon konventionelle Stufenlinsen Scheinwerfer ablösen?

Der L7 ersetzt aktuell je nach Fokussstellung einen 650 - 1000W Halogenscheinwerfer. Baubedingt sind Halogen-Stufenlinsen im Spot noch deutlich weniger effizient als im Flood. LED-Scheinwerfer sind etwa gleich effizient in Spot und Flood.

Rkra: Die Lichtstärken des ARRI L7 erreichen in max. Spot je nach Variante und Farbtemperatur derzeit bis zu typ. 67 kcd @3200 K (L7-TT) bzw. typ. 77 kcd @5600 K (L7-TD) bei sehr guten CRI's >> 90.

Was ist die Zukunft bzw. der Stand von aktiver und passiver Kühlung von LED-Stufenlinse? Was wird sich durchsetzen? Ab wann ist eine aktive Kühlung erforderlich oder kann man hohe Lichtstärken auch mit passiver Kühlung realisieren?

Wenn das Gewicht keine Rolle spielen würde, würde jeder passive Kühlung wollen. Aktive Lüfter erzeugen Geräusche, wobei moderne Lüfter derart leise sind, dass es in fast allen Anwendungsfällen nicht stört. Bei Leistungen ab 100W wird es sehr schwer noch ausreichend passiv zu kühlen. Die meisten Anwender können gut mit den Lüftern leben, weswegen ich nicht denke, dass wir in Zukunft viele Scheinwerfer mit passiver Kühlung sehen werden. Besonders nicht in den hohen Leistungen. Der Aufwand mit Heatpipes, Kühlblechen usw. wird irgendwann einfach zu gigantisch.

Wenn die LEDs noch deutlich effizienter werden und der Wärmeverlust sinkt, wird es leichter sein, auch Scheinwerfer über 100W passiv zu bauen. Auf der anderen Seite wird man dann aber auch versuchen, aktiv zu bleiben und einfach die Baugröße des Scheinwerfers zu reduzieren. Auch die Lüfter entwickeln sich ja noch weiter und werden noch leiser.

Wie ist der aktuelle Stand von LED-chips? Welche Art von LED werden genau in LED-Stufenlinse der Firma ARRI verbaut und wie sieht die Zukunft aus (Lichtstärke, Leistung)? Produziert ARRI sogar selbst LED-Chips?

ARRI setzt vor allem auf LEDs von PHILIPS und OSRAM. Zwei der renommiertesten Hersteller weltweit. Es gibt bereits heute LED-Arrays mit 100W, die man als eine große Super-LED ansehen kann. ARRI testet auch solche Produkte, aber durch die Farbmischung sind kleinere LEDs (ca. 3W) interessanter für ARRI. Diese können flexibel gemischt werden. Sicher ist mit 100W Super-LEDs auch noch nicht das Ende erreicht.

Werden ähnlich oder sogar gleiche LED-Chips Systeme bei großen Lampenherstellern verwendet?

Ja, natürlich. Letztlich ist der Film- und Fernsehlichtbereich nur ein marginaler Anteil am Lichtmarkt insgesamt. Die LEDs, die ARRI verwendet, verwenden auch andere. Aber die Zusammenstellung, Kalibrierung und Ansteuerung beim ARRI L7 ist sicher recht einzigartig. Es gibt kaum eine Branche, die derart hohe Anforderungen an die Lichtqualität stellt, wie die Film- und Fernsehlichtbranche. Farbmischsysteme in der Allgemein oder Eventbeleuchtung sind oft viel einfacher aufgebaut, als beim ARRI L7 und erreichen niemals dessen Lichtqualität. Das müssen sie für die Allgemeinbeleuchtung auch nicht.

Auszug aus dem Interview vom 02.02.14 mit Uwe Gebauer**#Wer bist du, was machst du?**

- Uwe Gebauer - gelernter Elektromonteur, ausgebildeter Meister für Veranstaltungstechnik / Beleuchtung und Bühnenbeleuchtungsmeister - angestellt bei einer Rundfunkanstalt als Beleuchter - Betätigungsfeld: Fernsehen (Bühnenshow, EB und Studio Produktion, Sportübertragung) Rock&Roll (Open Air- und Bühne) - Aufgabengebiet: Planung und Durchführung von Produktion inkl. Material, Personal und Design

#Was ist deine Meinung zum Thema LED und LED-Stufenlinsenscheinwerfer?

Thema LED:

- LED ist zum jetzigen Zeitpunkt in der Beleuchtungstechnik (Personenlicht) nur eine Ergänzung, aber kein Ersatz.
- z.Z. wird ein großer Rummel um diese Technik gemacht, obwohl diese in der Praxis noch weit entfernt von der konventionellen Technik ist.
- Die Werbung der Hersteller sind teilweise überzogen, was bei näherer Betrachtung der Datenblätter (falls vorhanden) aber zu erkennen ist.
- Es fehlt jede Art von Langzeitstudie in Bezug auf Haltbarkeit und Wirtschaftlichkeit.
- Die eingesparten Energiekosten werden durch extrem hohe Anschaffungskosten, die nötige Zusatztechnik und der höhere Personalaufwand auf mittelfristige Sicht ausgehebelt.
- Im Deko- und Effektlucht hat sich die LED Technik teilweise schon durchgesetzt.

Thema LED Stufenlinsenscheinwerfer:

- Ist mit noch keiner untergekommen und konnte somit damit noch nicht arbeiten.

#Setz du/Ihr Sie schon bei Produktionen ein? Wenn ja für welche und wo genau (Einsatzgebiet)? wenn nein Warum NICHT?

Dekolicht:

- hat sich LED durchgesetzt (kleinere Baumaße, besseres Wärmemanagement -> Brandschutz, flächige Ausleuchtung möglich).
- Nachteil: - Extrem hoher Aufwand zur Ansteuerung der LED (Pult, DMX Linien, Buster)
- Für Rock&Roll nur bedingt geeignet, da extrem empfindlich.

LED Videowände:

- teilweise im Einsatz (wird von externen Firmen angeboten)
- Nachteil: - Extrem hoher Aufwand zur Ansteuerung der LED
- Mindestabstand LED Wand - Kamera sehr hoch -> ansonsten sehr pixelig

Effeklicht:

- Bis zum mittleren Leistungsbereich schon weit verbreitet
- Hohe Leuchtdichte bedingt eine Große Anzahl an Einzel LED, daher z.Z. fast nur als Wash erhältlich.
- Häufiger Einsatz von Stripes an Bühnenkanten oder vor Rücksetzern.
- Nachteil: - Studiotaugliche Kühlung der LED sind sehr aufwendig, schwer und teuer
- Baulich anderes Wärmemanagement für Outdoor Leuchten -> hohes Gewicht
- IP Klassifizierung extrem wichtig -> wird von den Herstellern eher auf die leichte Schulter genommen

Personenlicht:

- Nur bei EB Produktionen und aktueller Berichterstattung.
- Kamerakopflicht: Eigentlich zu geringe Lichtleistung und zu kleiner Abstrahlwinkel (sieht man häufig im Fernsehen bei aktuellen Berichten an den Gesichtern) -> wird aber gern von den Kameralenten genommen (leicht und sparsam).
- Akku Handlampe: Nur eine Ergänzung, aber kein Ersatz für herkömmliche HMI Handlampen - es fehlt schlicht an Lichtleistung.
- Flächenleuchten: Vollwertiger Ersatz für das KinoFlo Konzept (Leuchtstofflampe). Teilweise mit Standard Kamera Akku zu betreiben und daher breites Einsatzfeld.
- Als Bühnen- oder Studiobeleuchtung nicht im Einsatz, da noch kein passendes Gerät gefunden und die Investitionen in die Millionen gehen.

#Welche Erfahrungen hast du mit dieser Technologie gemacht?

Als Personenlicht (Deko- und Effektlicht siehe oben):

- Sehr schön ist die stufenlose Regelung von Lichtfarbe und Leuchtstärke direkt am Gerät oder auch über DMX.
- Ca. 50% der bei uns getesteten LED Leuchten sind an der Praxis vorbei konstruiert (zu schwer, zu groß, zu laut, nur für innen, ungleichmäßige Ausleuchtung u.ä.).
- Die LEDs altern schnell. Dann ist die Farbtreue extrem eingeschränkt und die Einzel LEDs können meist nicht getauscht werden -> Kompletterverlust.
- Die Gleichmäßigkeit der Ausleuchtung ist ohne Zusatztechnik beschränkt.
- Bis vor kurzen war an jeder LED (Taschen) Lampe zu lesen: NICHT IN DEN LICHTSTRAHL SCHAUEN, da dem Laser ähnliche Wellen erzeugt werden.

Da es keine gesetzlichen Vorschriften oder Verordnungen dazu gibt, ist dieser Warnhinweis an "Profi" LED Technik nicht zu finden (dann wäre manches Produkt eine Fehlentwicklung).

Ab einer gewissen Lichtleistung kann man ohne entsprechende Filtertechnik (Streuscheiben o.ä. -> die nehmen aber ca. 25% der so schon mageren Lichtausbeute weg) nicht mehr in die Lampe schauen -> Gesundheitsrisiko.

Werden sich durch die Technologie neue Einsatzfelder bzw. Gestaltungsmöglichkeiten eröffnen?

- Die Designer und Szenenbildner sind schwer begeistert und entwerfen die unmöglichsten Dekorationen (leider sieht man im Fernsehen meist nicht viel davon).
- Die Lichtgestaltung wird sich nicht ändern, es ändert sich nur die Beleuchtungstechnik

#Wann wird sich diese Technologie durchsetzen und wird sie sich überhaupt deiner Meinung nach vollständig durchsetzen?

- Wenn die Technik ausgereift (in allen Gesichtspunkten) und bezahlbar ist, wird sie sich durchsetzen.
- Die Hersteller müssen erst lernen, eine langfristige Modellpolitik zu betreiben und den dringend notwendigen Service zur Verfügung zu stellen.

Auszug aus dem Interview vom 17.02.14 mit Markus Buchner

Also, ganz interessant [für die Beleuchtung des neue Medienzentrums der HSMW] sind:

ARRI L7-T, ETC S4 LED (+ CYC), ARRI True Blue ST2

Dazu noch ein paar Flächenleuchten (NesyFlex 660), Horizontleuchten (ARRI CYC 1000 2-Bank, Desisti Giotto MK2, Despar Integra HZ3) und zwei Verfolger, da ist der Typ noch unklar, Robert Juliat Ginger z.B.

O. CD-ROM mit Messergebnissen und Berechnungstabelle

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe. Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Berlin, 20.02.2014

Ort, Datum

Vorname Nachname